

«Хакінг» АС/DC-конвертера

Стів Робертс (Steve Roberts)

«Злом», або «хакінг» (hack), – прогресивне рішення, що використовує щось для певної мети, для якої це «щось» від початку не було призначене. Зазвичай хакінг роблять заради розваги, але він може слугувати і для більш серйозних речей, даючи змогу знайти неординарне рішення, недосяжне за звичайного підходу.

У першій статті блоку статей про «хакінг» конвертера було описано «хакінг» DC/DC-конвертера [1]. А у цій частині опишемо, як можна «зламати» звичайний АС/DC-конвертер.

У статті розглянуто п'ять оригінальних прикладів використання встановлених на плату АС/DC-конвертерів, що дає змогу їх використовувати в різних застосуваннях.

Як приклад візьмемо сучасну зарядну станцію для електромобілів, де необхідно забезпечити живлення допоміжного джерела від одно- або трифазної мережі, а також від низьковольтної та високовольтних шин постійної напруги. До того ж джерело має забезпечити вихідну біполярну напругу ± 10 В для живлення відкаліброваних датчиків і підсилювачів струму та напруги (рис. 1).

Після багатогодинних пошуків ви не знаходите серійного джерела живлення з необхідними характеристиками в

жодного із виробників. І що ж робити? Треба «хакнути» АС/DC-конвертер!

СПОСІБ 1: ВИКОРИСТОВУВАТИ ЗНИЖУВАЛЬНІ ДІОДИ

Зазвичай малопотужні АС/DC-конвертери не забезпечені функцією підстроювання вихідної напруги. Причини досить проста. На відміну від ізолюваного DC/DC-конвертера, наприклад $24 \rightarrow 5$ В з коефіцієнтом трансформатора 5:1, відповідний АС/DC-конвертер із вхідною напругою 230 В АС RMS з 5 В на виході вимагає трансформатора 65:1. Це пов'язано з тим, що впрявлена вхідна напруга значно вища

за вхідну. Коло зворотного зв'язку АС/DC-конвертера оптимізовано для компенсації широкого діапазону вхідної напруги (зазвичай 85–264 В АС) і фіксованої вихідної напруги. Якщо зробити змінною і вихідну напругу, то поєднання несприятливого відношення вхід/вихід і високого коефіцієнта трансформації може призвести до нестабільної роботи перетворювача.

Очевидно, що можна використати звичайний лінійний стабілізатор на кожній вихідній лінії ± 12 В і отримати стабілізований вихід ± 10 В, але чи є менш дороге і більш елегантне рішення?

Напівпровідникові діоди мають пряме падіння напруги в межах 0.6–0.7 В. Відповідно, на трьох послідовних діодах падіння становитиме близько 2.1 В (рис. 2).

Необхідно взяти до уваги нагрівання діодів, оскільки за струму 500 мА розсіювана потужність становить 350 мВт, тому потрібен вибір відповідних діодів.

Аналогічне рішення можна застосувати і з однополярним АС/DC-конвертером. Зниження напруги з 15 до 13.6–13.8 В для безперервного заряджання 12-В акумулятора можна реалізувати двома послідовними діодами в колі +Vout (рис. 3). Такі зарядні пристрої знаходять застосування в системах сиг-

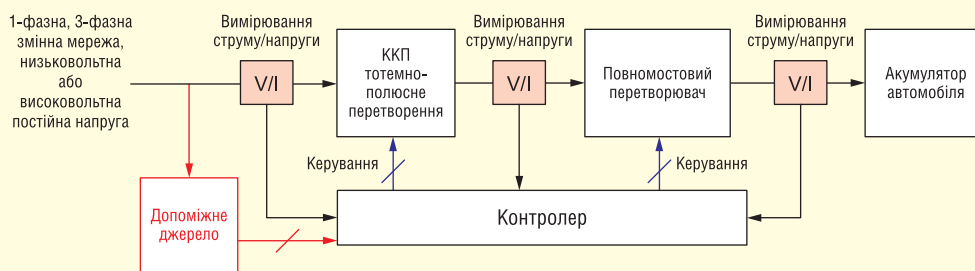


Рис. 1. Зарядна станція з універсальним живленням від АС-мережі або DC-шин

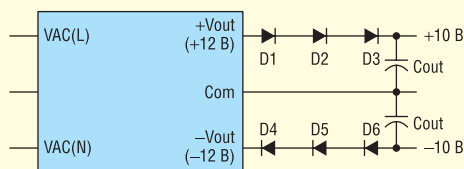


Рис. 2. Знижувальні діоди

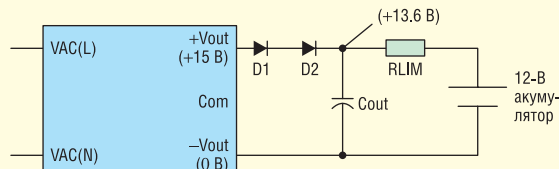


Рис. 3. Зарядний пристрій зі знижувальними діодами

налізації та безпеки, оскільки необхідно забезпечити роботу і за відсутності напруги в мережі.

Використання знижувальних діодів вважається простим, але не дуже ефективним способом через втрати на розсіювання потужності. Встановлення імпульсних регуляторів на виході не тільки видається більш ефективним методом, а й дає змогу здійснювати підстроювану напругу.

СПОСІБ 2: РЕГУЛЮВАННЯ ПОЗИТИВНОЇ ТА НЕГАТИВНОЇ ШИН НАПРУГИ

Лінійні стабілізатори негативної напруги вимагають наявності двополярної шини живлення і досить дорогі. А чи є можливість зробити двополярну шину тільки від однополярного виходу АС/DC-конвертера? Продемонструємо такий спосіб.

Неізолювані імпульсні регулятори мають той самий функціонал, що і звичайні лінійні, а також випускаються моделі, сумісні з ними за виводами, — наприклад, серія R-78 RECOM. Проте їхня внутрішня конструкція значно відрізняється. Якщо вихід імпульсного регулятора під'єднано на «землю», то на виводі GND встановлюється негативна напруга. У результаті ми отримуємо необхідний перетворювач (рис. 4).

На рисунку 4 показано джерело живлення з кількома виходами: +12 В, і два підстроюваних +1...+10 В і -1...-10 В, з використанням трьох основних недорогих компонентів. RAC05-12SK є універсальним джерелом живлення (вхід 85–264 В АС) потужністю 5 Вт для встановлення на плату з розміром основи всього 1×1", яке не потребує об'язки.

Два неізолюваних модулі RPX-1.0 використовуються для генерації шин живлення, що настроюються, — позитивної та негативної. RPX-1.0 є повноцінним DC/DC-модулем із вбудованою індуктивністю. Незважаючи на великий вихідний струм 1 А, розміри основи становлять лише 5×3 мм, а висота корпусу 1.6 мм. Таким чином, все джерело живлення може бути реалізоване на платі розміром 1×1", зі встановленими SMD-компонентами на нижньому боці поруч із виводами АС/DC-конвертера (рис. 5).

Додаткова перевага використання регуляторів у вторинному колі — стабільність напруг навіть за сильно асиметричного навантаження. Двополярний вихід АС/DC-конвертера не може забезпечити стабільність напруги,

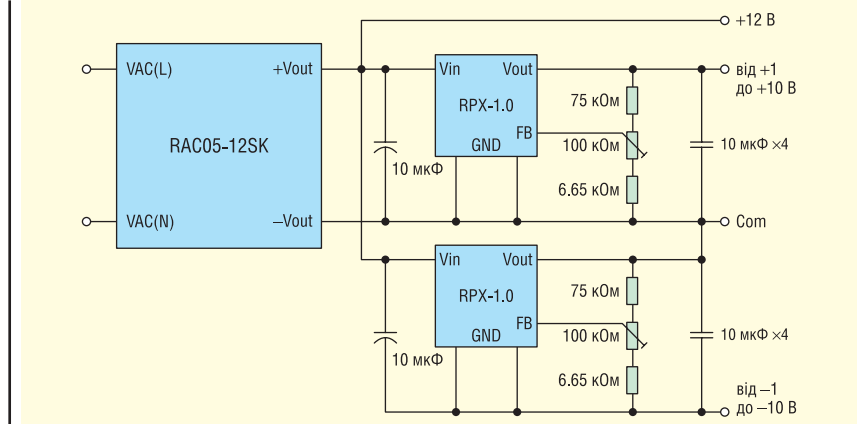


Рис. 4. Підстроювані біполярні (±) шини живлення від однополярного АС/DC-конвертера

оскільки має тільки один зворотний зв'язок внутрішнього кола регулювання. Є два варіанти:

- або стабілізується розмах між позитивною і негативною напругою, а нульовий вивід залишається не задіяним (рис. 6);
- або стабілізується одна з напруг позитивної або негативної шин, а інша залишається «плаваючою», у разі такого підходу та наявності асиметрії за навантаженням — наприклад, 100%-ної за позитивною і 10%-ної за негативною — вихідна напруга також буде розбалансована (табл. 1).

Ці методи стабілізації забезпечують прийнятну напругу за збалансованого навантаження. Однак спостерігається суттєва різниця між такими підходами, коли навантаження розбалансоване. Перевагою стабілізації загальної напруги є те, що сума позитивної та негативної шин залишається постійною, а стабілізація позитивної або негативної шин робить стабільною саме її. У будь-якому разі, за цих підходів не існує оптимального рішення.

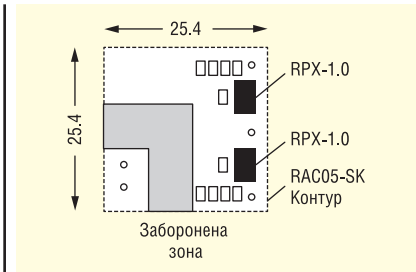


Рис. 5. Можливе компонування плати АС/DC-джерела з трьома виходами розміром 25.4×25.4 мм (1×1")

Однак якщо для стабілізації використовують імпульсні регулятори, як було показано на рисунку 4, то обидві шини залишаються стабільними навіть за великого розбалансу за відсутності навантаження на одному виході та повного на іншому.

Застосування імпульсних регуляторів дає додаткову перевагу — вони забезпечують постійну потужність на виході. Що нижча вихідна напруга, то вищий струм. Якщо в прикладі на рисунку 4 виходи налаштовані на ±3.3 В, то доти,

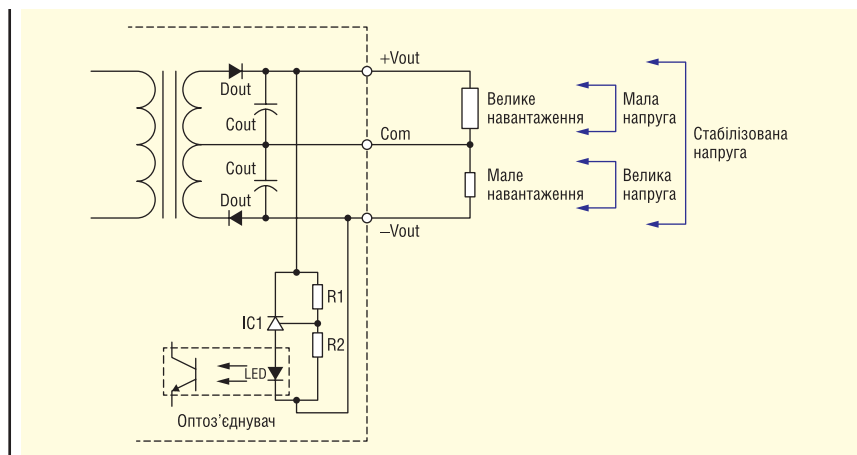


Рис. 6. Несиметричне навантаження (стабілізація загальної напруги між +Ve і -Ve)

Таблиця 1. Порівняння стабілізації двополярних джерел (номинал 12 В)					
Метод стабілізації	Навантаження + шини, %	Навантаження - шини, %	Напруга + шини, В	Напруга - шини, В	Загальна напруга, В
Загальна напруга	100	100	+12	-12	24*
	100	10	+11	-13	24*
	10	100	+13	-11	24*
Тільки негативна	100	100	+12	-12*	24
	100	10	+11	-12*	23
	10	100	+13	-12*	25
Тільки позитивна	100	100	+12*	-12	24
	100	10	+12*	-11	23

Примітка. * Параметр, що стабілізується.

доки загальна потужність, що споживається, менша за 5 Вт, струм по кожній із шин може досягати 1 А, що значно більше за номінальний вихідний струм AC/DC-конвертера 416 мА. Ця особливість необхідна в застосуваннях із кількома шинами живлення, оскільки зазвичай значно більшу потужність споживають тільки на одній із шин, що не стає проблемою під час використання імпульсних регуляторів. У прикладі на рисунку 4 можливий варіант, +12 В при 0.1 А, +3.3 В при 1 А і -3.3 В при -0.15 А з повноцінною стабілізацією виходів.

Досі ми розглядали тільки приклади з AC/DC-модулями, але що буде, якщо використовувати альтернативні джерела живлення? Для цього є такий спосіб.

СПОСІБ 3: ЗОВНІШНЄ DC-ДЖЕРЕЛО І ВИХІД AC/DC-КОНВЕРТЕРА

У деяких специфічних застосуваннях потрібно використовувати або AC-, або DC-джерело залежно від доступності. Як видно на рисунку 7, якщо зовнішнє DC-джерело під'єднано до виходу AC/DC-модуля, вихідний діод Dout запобігає протіканню зворотного струму через вторинну обмотку трансформатора.

Однак шунтувальний регулятор IC1 залишається в колі. Якщо зовнішня напруга перевищує уставку шунтувального регулятора, він вмикається, що призводить до протікання струму через діод оптопари.

Оскільки AC/DC-конвертер неактивний — немає механізму, що обмежує струм через діод оптопари, і це може вивести її з ладу. Таким чином, пряме підключення постійної напруги на вихід AC/DC-конвертера не рекомендовано.

Можна застосувати два розділювальні діоди для запобігання впливу джерела живлення з більшою напругою на інший під час об'єднання їх за виходом (рис. 8).

Однак цей прийом хоч і є простим, має два суттєві недоліки. Перший — ви-

хідна напруга завжди нижча за джерело на падіння на діоді. Другий — за істотних струмів навантаження потужність, що розсіюється на діодах, стає досить значною (у прикладі на рис. 8 — 3.5 Вт). Фактично потрібне застосування масивних дорогих діодів із додатковим радіатором для відведення тепла. Також втрати потужності на діоді D2 значно скорочують час роботи від акумулятора.

Удосконалити цей спосіб можна за допомогою мікросхеми «ідеальний

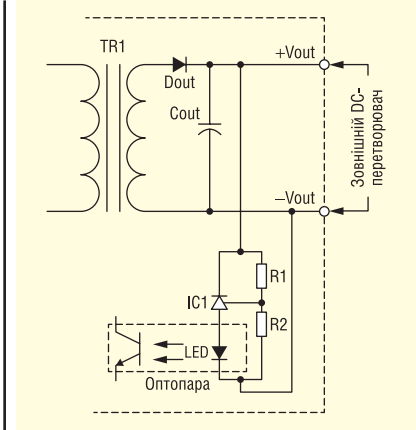


Рис. 7. Типовий вихідний каскад AC/DC-конвертера

діод», наприклад, компактного рішення LM71300 компанії Texas Instruments із вбудованими польовими транзисторами (рис. 9). У цьому рішенні є додаткові дуже корисні особливості: акумулятор дуже захищено від глибокого розрядження завдяки реалізації захисту від падіння

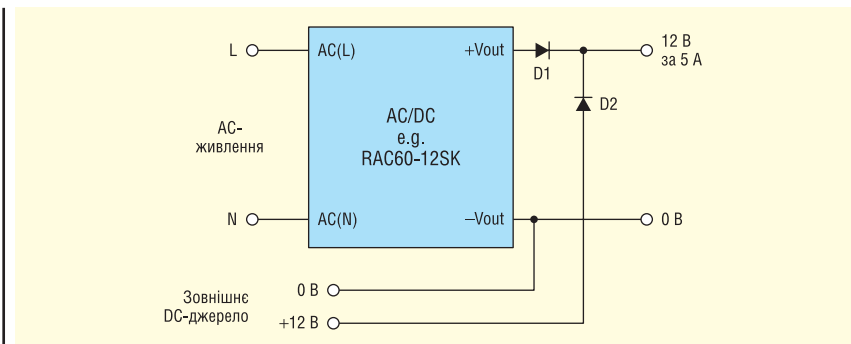


Рис. 8. Використання розділювальних діодів для AC- і DC-джерел живлення

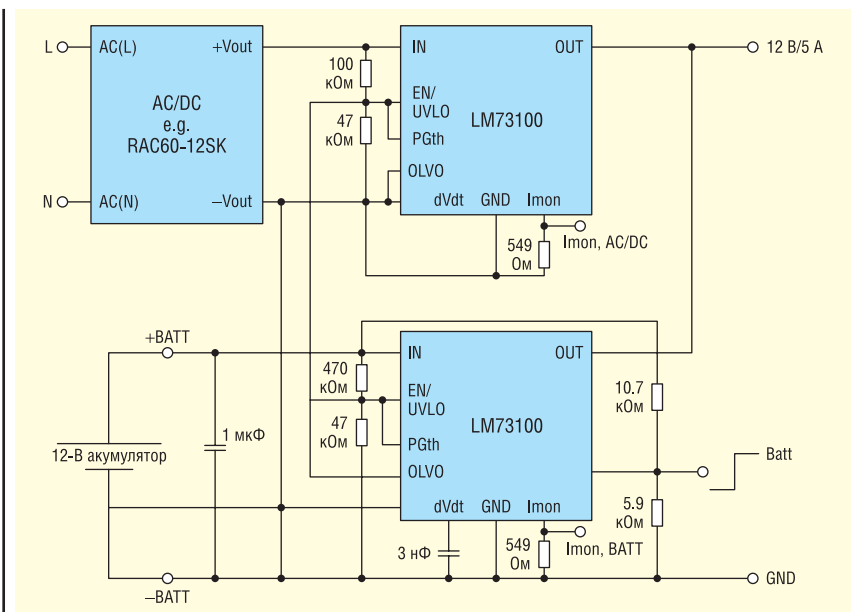


Рис. 9. Мікросхема контролера «ідеальний діод» для підключення AC-джерела та акумулятора

напруги (UVLO), а саму схему — від впливу стрибків струму завдяки контролю dv/dt . Так само можна відстежувати струм навантаження за обома джерелами, використовуючи вивід I_{mon} .

СПОСІБ 4: ФАЗОВЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Попередні способи були пов'язані з вихідними каскадами джерел. Підхід виглядає розумним, оскільки напруга в мережі несе певну небезпеку і під час роботи з нею необхідно проявляти особливу обережність. Повертаючись до прикладу із зарядної станцією, розглянутого на початку статті, зазначимо, що необхідно забезпечити роботу від однієї або декількох фаз мережевої напруги, а також від високовольтної DC-шини. Відповідно, цей спосіб стосується первинної сторони.

Трифазний однопівперіодний випрямляч, показаний на рисунку 10, видає постійну напругу приблизно 1.17 V_{phase} або приблизно 270 В за мережевої фазної 230 В. Це досить багато для стандартного AC/DC-конвертера з діапазоном $230 \text{ В} \pm 10\%$, але допустимо для моделей AC/DC, спеціально розроблених для діапазону 277 В AC (фаза-фаза в мережі 115 В AC). У схемі, показаній на рисунку 10, використовують запобіжники для захисту, якщо відбувається вихід із ладу одного з діодів, а також передбачено металооксидний варистор (MOV) для поглинання стрибків напруги, які можуть вивести конвертер із ладу. Варистор не є обов'язковим, оскільки конвертер має вбудований запобіжник, але може знадобитися відповідно до місцевих вимог до електроустановок і монтажу. Вхідні діоди також повинні мати необхідний запас за допустимою зворотною напругою.

У разі зникнення однієї з трьох фаз конвертер продовжить роботу, тому цей спосіб може знайти застосування в системах моніторингу та оповіщення, наприклад сигналізації, саме за відсутності фази.

Серія конвертерів компанії RECOM із суфіксом /277 забезпечує роботу при вхідному діапазоні 85–305 В AC. Таким чином, за такого підключення можна використовувати будь-який конвертер цієї серії.

Якщо в системі відсутня нейтраль або в разі її обриву, напруга між фазними провідниками становить $\sqrt{3} V_{rms}$ або близько 400 В за фазної 230 В, що перевищує межі більшості AC/DC-модулів, окрім спеціально розроблених для такого завдання, наприклад серія /480, із вхідним діапазоном 85–528 В AC або 120–745 В DC.

Як ми зазначали раніше, ці способи слід використовувати з обережністю, оскільки ми працюємо з високими небезпечними рівнями напруг. Крім того, вимоги щодо безпеки можуть передбачати додаткові захисні заходи — зокрема, більшу відстань пробою повітрям і поверхнею або підвищену напругу пробою ізоляції, які це підключення роблять неприйнятним. Так, під час під'єднання до мережі слід забезпечити безпеку щодо перенапруг згідно з категорією III або IV.

Ці вимоги передбачають використання останнього способу — заземлення виходу AC/DC-конвертера для безпеки.

СПОСІБ 5: ЗАЗЕМЛЕННЯ ВИХОДУ

Оскільки ми працюємо з ізольованими AC/DC-конвертерами, вихід є плаваючим (гальванічно розв'язаним

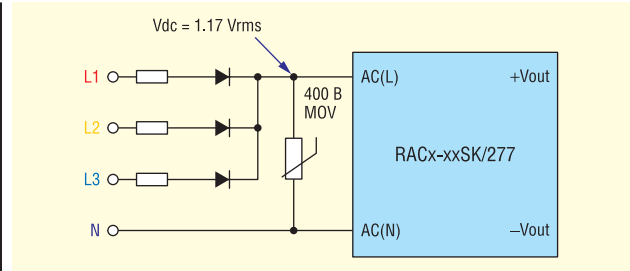


Рис. 10. Фазове резервування з трифазним однопівперіодним випрямлячем

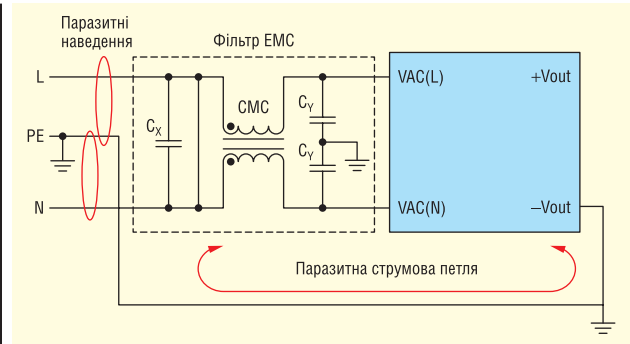


Рис. 11. Рекомендований вхідний фільтр у разі заземлення виходу

із виходом), тому вихід може забезпечити як позитивну, так і негативну напругу. Наприклад, поширена напруга шини живлення в телекомунікаційному обладнанні становить -48 В DC і може бути забезпечена будь-яким AC/DC-модулем із виходом 48 В або $\pm 24 \text{ В}$ під'єднанням $+V_{out}$ до 0 В, а виводу $-V_{out}$ — безпосередньо до шини живлення.

У деяких випадках заземлення шини живлення стає вигідним або в принципі неминучим. На перший погляд, це може здатися досить простим у вихідній реалізації в попередньому прикладі шини -48 В . Однак правила для AC/DC-джерел живлення стосуються не тільки безпеки, а й забезпечення прийнятної рівня ЕМЗ. Будь-які наведені струми, проходячи через паразитну ємність ізоляції, можуть спричинити завади, що, зі свого боку, призведе до провалу тестування з ЕМС. Крім того, заземлення виходу практично гарантовано забезпечить струмову петлю. Наприклад, для пристроїв класу В струм у кілька десятків мікроампер призведе до виходу завад за допустимі межі.

Для забезпечення вимог щодо ЕМС необхідно використовувати зовнішній мережевий фільтр із синфазним дроселем (рис. 11).

Два Y-конденсатори створюють низькоімпедансний шлях для струмів завад на «землю», тоді як синфазний дросель (СМС) нівелює синфазні завади по виводах $VAC(L)$ і $VAC(N)$, які не потрапляють на вхід AC/DC-модуля. X-конденсатор на вході в поєднанні з синфазним дроселем допомагає послабити диференціальний шум. Високоомний опір, під'єднаний паралельно C_x , є опціональним і використовується для розрядження конденсатора під час вимкнення джерела живлення (потрібен у деяких стандартах безпеки). Готові мережеві фільтри доступні у багатьох виробників.

Література:

1. Стив Робертс (Steve Roberts), «Хакінг» DC/DC-конвертера // CHIP NEWS. 2023. № 2.