

ЧИ Є АЛЬТЕРНАТИВА ВИКОРИСТАННЮ DC/DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КОМУТОВАНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ ДЛЯ ШВИДКОЇ ЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРІВ?

У статті наведена інформація про результати моделювання роботи перетворювачів енергії постійного струму з комутованим конденсатором та на базі синхронного перетворювача з використанням котушки індуктивності. Результати моделювання показують високу ефективність таких перетворювачів, яка потенційно може сягати 98.7%. Показано що складність перетворювача з комутованими конденсаторами набагато більша від складності синхронного перетворювача, і чутливість до зміни параметрів силових ключів у синхронного перетворювача набагато нижча.

В. Макаренко

USB використовується в якості стандарту для роз'ємів і пов'язаних з ними сигналів і подачі живлення з 1996 року. До останніх розробок, застосованих до блоків живлення, відносяться конструкції USB Type-C®, специфікація роз'єму (USB-C) і USB-джерел живлення (USB PD), а також специфікації USB-програмованого джерела живлення (PPS). Ці удосконалення роблять USB відмінним варіантом в якості джерела живлення потужністю до 100 Вт. У порівнянні з більш традиційними силовими інтегральними схемами (IC) на основі понижувальних або підвищувальних перетворювачів, перетворювачі з конденсаторами що перемикаються стали кращим рішенням для живлення при використанні USB Type-C.

Перетворювачі з конденсаторами що перемикаються забезпечують більш високу ефективність у порівнянні з традиційними перетворювачами і може бути $\geq 98\%$ [1], що дозволяє отримати ефективне і економічне рішення, яке повною мірою використовує переваги стандарту USB Type-C PD PPS. Такі перетворювачі також стали кращим рішенням для зарядки акумуляторів, оскільки виробники портативних пристроїв беруть участь в гонці за те, щоб першими вивести на ринок рішення з найшвидшою зарядкою. Наприклад, всього за кілька років потужність зарядних пристроїв телефонів зросла з 18 Вт до 120 Вт. Новітнє рішення з високою ефективністю (98,6%) для швидкої зарядки з конденсаторами що перемикаються заряджає акумулятор ємністю 4

IS THERE AN ALTERNATIVE TO USING DC/DC CONVERTERS WITH SWITCHED CAPACITORS FOR FAST BATTERY CHARGING?

Abstract – The article provides information on the results of modeling the operation of DC energy converters with a switched capacitor and based on a synchronous converter using an inductor. The simulation results show a high efficiency of such converters, which can potentially reach 98.7%. It is shown that the complexity of a converter with switched capacitors is much greater than that of a synchronous converter, and the sensitivity to changes in the parameters of power switches in a synchronous converter is much lower.

V. Makarenko

Агод за 15 хвилин, забезпечуючи потужність 120 Вт від джерела живлення USB PPS.

USB PD веде свою історію з 2012 року – з того моменту, як був представлений порт Type-C PD PPS. Технологія Power Delivery прийшла на зміну більш старій технології зарядки USB Battery Charging (USB BC), яка була розроблена з метою підвищення потужності зарядки щодо базових специфікацій порту USB. Таким чином, USB Power Delivery – це вже третя версія технології зарядки пристроїв через USB-порти, яка відрізняється більшою гнучкістю профілю потужності зарядки (за рахунок розширення діапазону опцій напруги), що дозволяє забезпечити оптимальну швидкість зарядки конкретного пристрою.

Порти USB Type-C можуть підтримувати зарядний струм 1.5 і 3 А при напрузі 5 В, забезпечуючи потужність до 15 Вт, що дозволяє заряджатись пристроям набагато повільніше в порівнянні з тією швидкістю, яку пропонують інші стандарти швидкої зарядки.

Зарядка USB Power Delivery набагато потужніша (підтримується потужність до 100 Вт), що дозволяє заряджати найвимогливіші пристрої, включаючи ноутбуки. До того ж ця технологія безпечніша, оскільки пристрої взаємодіють один з одним через USB-кабель, що дозволяє забезпечити оптимальну для даного гаджета потужність зарядки [2]. Підтвердження встановлення зв'язку між пристроями дає можливість здійснювати налаштування напруги зарядки на найбільш підходящий рівень – 5, 9, 15 або 20 В, що

дозволяє отримати на виході потужність в діапазоні від 0.5 до 100 Вт. Новий стандарт програмованої подачі живлення USB Power Delivery Programmable Power Supply (USB PD PPS) дозволяє, крім того, регулювати в процесі зарядки самі рівні зарядної напруги, забезпечуючи максимально ефективну оптимізацію режиму зарядки за часом. Якщо два пристрої відмовляються встановлювати зв'язок при відповідному рівні потужності, USB Power Delivery за замовчуванням переходить до "найближчої" опції режиму зарядки, підтримуваної релевантним USB-протоколом, наприклад, USB-C 1.5 A.

У табл. 1 наведені специфікації (номінальна напруга і максимальний струм) режимів USB-зарядки в порядку зниження рівня технології.

У 2017 році USB Implementers Forum (USB-IF), організація, яка підтримує розвиток технології USB, додала швидку зарядку PPS до стандарту USB PD 3.0, створивши уніфіковане рішення для сучасних пристроїв швидкої зарядки. На поточний момент стандарт USB Power Delivery налічує три версії, які розраховані на пристрої які дещо відрізняються за своїми можливостями. Хоча сучасні версії стандарту мають зворотну сумісність по відношенню до старших моделей, які можуть використовуватись як в якості заряджаючих пристроїв, так і пристроїв що заряджаються.

Технологія першого покоління USB PD 1.0 в порівнянні з сучасною версією виглядає вже застарілою. Вона просто забезпечує шість фіксованих профілів потужності для різних категорій пристроїв. Підтримуються наступні опції: 10 Вт (5 В, 2 А), 18 Вт (12 В, 1.5 А), 36 Вт (12 В, 3 А), 60 Вт (12 В, 5 А), 60 Вт (20 В, 3 А) і 100 Вт (20 В, 5 А). Це добре, але не дозволяє точно підлаштуватися під ряд пристроїв, в числі яких смартфони з невеликою ємністю батареї, що віддають перевагу зарядці при меншій напрузі.

У більш сучасних версіях USB Power Delivery 2.0 і 3.0 замість цих фіксованих профілів застосовуються більш гнучкі – опції напруги зарядки залишаються фіксованими, зате узгоджений з заряджаємим

пристроєм зарядний струм може варіюватися в досить широких межах. В результаті отримуємо набагато більш гнучкий стандарт, який краще підходить для широкого діапазону пристроїв. Версія USB Power Delivery 3.0 також розширює комунікаційний протокол, який тепер підтримує такі функції, як передавання інформації про батарею пристрою-приймача, зарядну потужність пристрою-джерела, посиленний захист даних і можливість швидкої зміни функціональних "ролей" приймача і джерела зарядки (Fast Role Swapping).

Технологія швидкої зарядки PPS – це найсучасніша технологія зарядки пристроїв USB Type-C. Технологія дозволяє регулювати напругу та силу струму в режимі реального часу залежно від стану зарядки пристрою, живлячи його максимальною потужністю.

Програмований блок живлення PPS дозволяє ступінчасто змінювати струм і напругу. Це зменшує втрати перетворення під час заряджання, забезпечуючи більш високу ефективність. При більш високій ефективності виділяється менше тепла і термін служби батареї збільшується. Отже, швидка зарядка PPS краще для акумуляторів різних пристроїв.

Швидка зарядка (QC) – це один із найпоширеніших протоколів швидкої зарядки на ринку, який є у багатьох популярних смартфонах. Він був винайдений компанією Qualcomm, яка випускає процесори для мобільних пристроїв. Стандарт заряджання підтримує зворотну сумісність, що означає, що зарядний пристрій QC 4+ може швидко заряджати пристрій QC 3.0. Швидка зарядка забезпечується за рахунок збільшення напруги заряджання, підвищуючи потужність у цьому процесі. QC 5, останній стандарт технології Quick Charge, може зарядити смартфон до 50% за п'ять хвилин. Samsung Galaxy S20 був першим смартфоном, сертифікованим для швидкої зарядки PPS. Багато сучасних ноутбуків підтримують протокол зарядки PPS і можуть заряджатися швидше, безпечніше та ефективніше.

У табл. 2 наведені основні характеристики зарядних пристроїв з протоколом зарядки PPS.

Таблиця 1. Специфікації режимів USB-зарядки

Рівень	Режим роботи	Номінальна напруга	Максимальний струм
Найвищий	USB PD	Конфігуруєма	5 А
	USB Type-C Current @ 3.0 A	5 В	3.0 А
	USB Type-C Current @ 1.5 A	5 В	1.5 А
Нижчий	USB BC 1.2	5 В	до 1.5 А
	Живлення через USB за замовчуванням	5 В	900 мА
		5 В	500 мА

Таблиця 2. Основні характеристики зарядних пристроїв з протоколом зарядки PPS

Потужність зарядки USB PD, Вт	Фіксована напруга зарядки, В	Узгоджений струм зарядки, А	Пристрої
0.5...15	5	від 0.1 до 3.0	Наушники, деякі аксесуари з USB
15...27	9	від 1.67 до 3.0	Смартфони, фото- та відеокамери, дрони
27...45	15	від 1.8 до 3.0	Планшети, компактні ноутбуки
45...100	20	від 2.25 до 3.0 – через будь який USB-кабель. від 3.0 до 5.0 – тільки через USB-кабель відповідного призначення	Великі ноутбуки, дисплеї

Перетворювачі постійного струму з конденсаторами що перемикаються являють собою перетворювачі енергії, які використовують тільки конденсатори та перемикачі для передачі енергії між входом і виходом. Як стверджується у [1], порівняно з перетворювачами постійного струму на основі котушок індуктивності, перетворювачі з конденсаторами забезпечують більш високу щільність потужності (конденсатори накопичують у 10-100 разів більше енергії, ніж котушки індуктивності), низькі електромагнітні завади (EMI) і більш низьку вартість.

Один з варіантів DC/DC-перетворювача з конденсаторами що перемикаються містить чотири ключа для попереминої зарядки і розрядки "плаваючого" конденсатора [1]. На рис. 1 наведена спрощена функціональна схема перетворювача з комутованим конденсатором і зміною фази зарядки/розрядки "плаваючого" конденсатора. Вихідна

напруга складає половину вхідної напруги, а вихідний струм в два рази перевищує вхідний струм.

На першому етапі ключі S1.1 та S1.2 замкнені і конденсатори $C_{\text{плав}}$ і $C_{\text{вих}}$ заряджаються від джерела постійної напруги $U_{\text{вх}}$. При однаковій ємності конденсаторів кожний з них заряджається до половини вхідної напруги. На другому етапі замкнені ключі S2.1 та S2.2. Обидва конденсатора з'єднуються паралельно і розряджаються через опір навантаження, формуючи струм $I_{\text{вих}}$.

Для перевірки ефективності такого перетворювача використана модель створена в середовищі Multisim (рис. 2). Перемиканням ключів S1 та S2 управляють генератори V2 та V3. Імпульси управління з періодом слідування 1 мкс мають тривалість 0.48 мкс і зсунуті по фазі на 0.5 мкс для створення захисного інтервалу між часом перемикання ключів (рис. 3). Опір відкритих ключів задано 10 мОм.

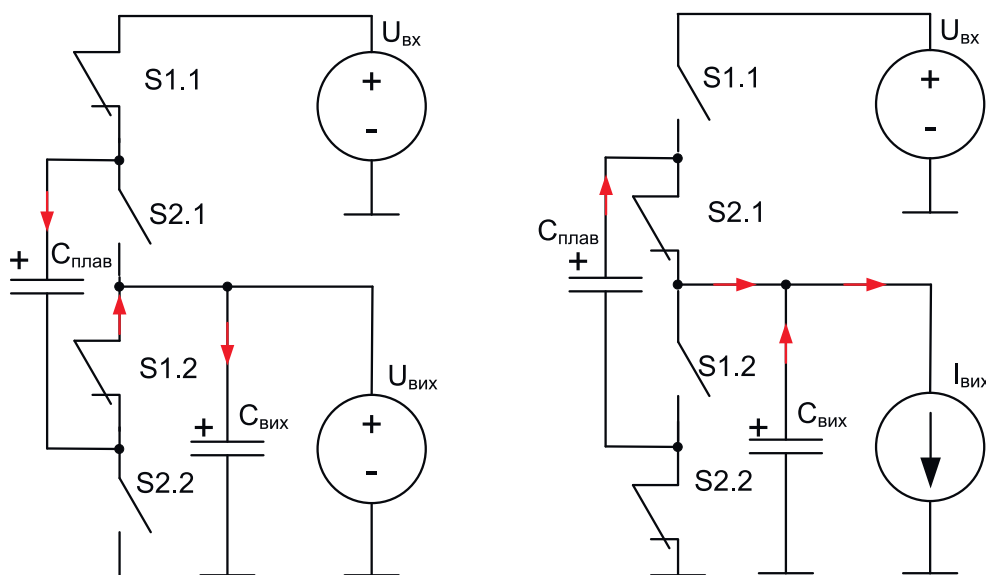


Рис. 1. Спрощена функціональна схема перетворювача з комутованим конденсатором в режимі зарядки (а) та розрядки (б) "плаваючого" конденсатора

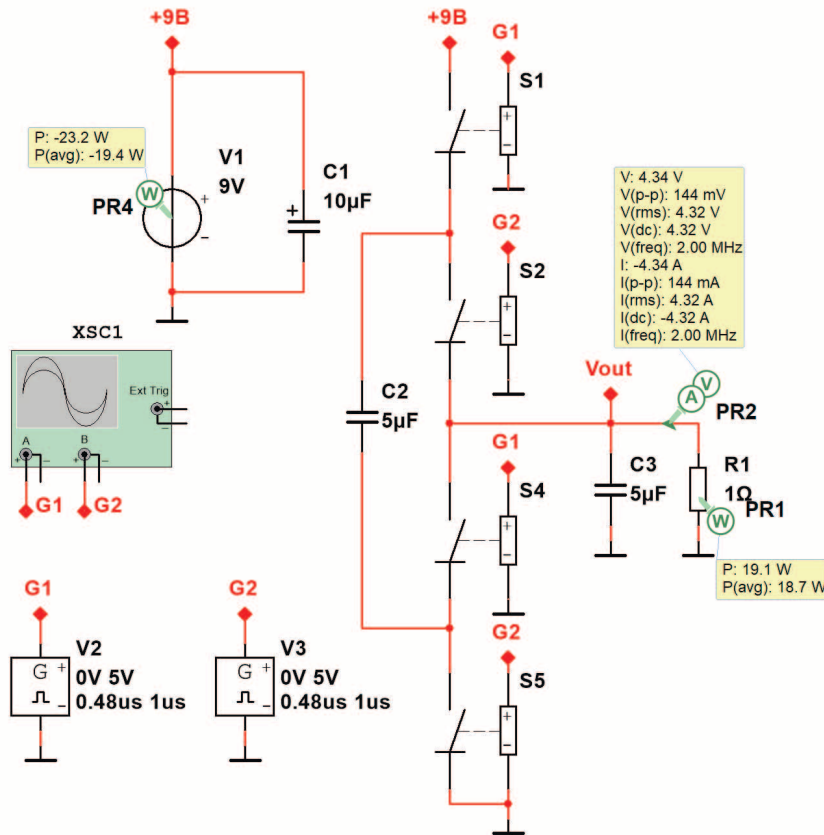


Рис. 2. Модель DC/DC-перетворювача з комутованим конденсатором

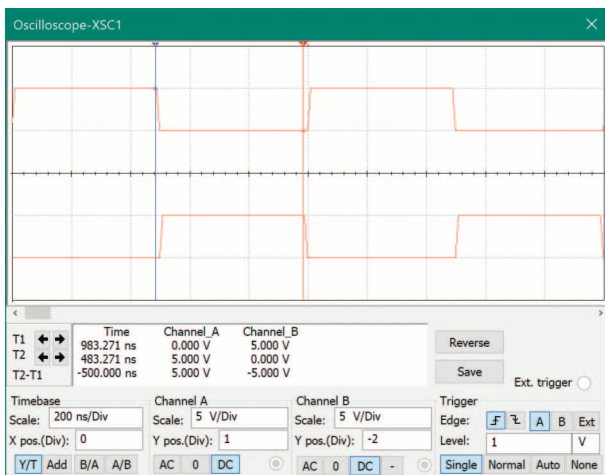


Рис. 3. Осцилограми сигналів керування силовими ключами

При таких заданих параметрах і ідеальних конденсаторах ємністю 5 мкФ вихідна напруга становить 4.32 В, а коефіцієнт корисної дії дорівнює відношенню середньоквадратичних потужностей $P(\text{avg})$:

$$\text{ККД} = P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}} = (18.7/19.4) \cdot 100\% = 96.4\%.$$

При збільшенні опору відкритих ключів до 0.1 Ом

ККД зменшується до 82.6%, а вихідна напруга зменшується до 3.72 В.

При збільшенні ємності конденсаторів до 10 мкФ і опорі ключів 10 мОм ККД зростає до 96,95%, а при опорі ключів 0.1 Ом – знижується до 82.7%. Тобто при відносно великих опорах відкритого ключа збільшення ємності практично не впливає на ККД перетворювача.

При паралельному з'єднанні двох перетворювачів що працюють у протифазі (рис. 4) вихідна потужність збільшується і ККД становить 98.5% при напрузі $U_{\text{вих}} = 4.44$ В і опорі відкритих ключів 10 мОм. При опорі ключів 0.1 Ом ККД = 90.7% а вихідна напруга знижується до $U_{\text{вих}} = 4.07$ В.

З проведених дослідів випливає що на ККД впливають як ємності конденсаторів перетворювача так і значення опорів силових ключів. В табл. 3 наведені залежності параметрів перетворювача (рис. 2) з комутованим конденсатором від ємності конденсаторів при опорах ключів 10 мОм і опорі навантаження 1 Ом.

Теоретично розраховане значення вихідної напруги при вірно обраних значеннях ємностей конденсаторів повинно дорівнювати:

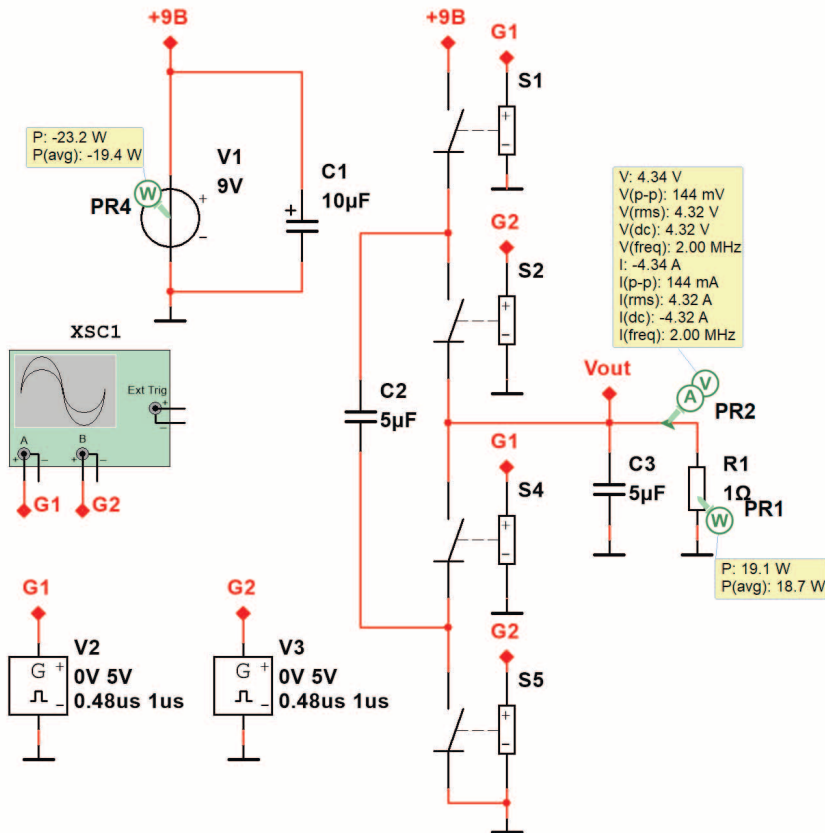


Рис. 4. Паралельне з'єднання двох перетворювачів з комутованим конденсатором, працюючих у протифазі

Таблиця 3. Залежність параметрів перетворювача на рис. 2 з комутованим конденсатором від ємності конденсаторів при опорі ключів 10 мОм і опорі навантаження 1 Ом

C, мкФ	U _{вих} , В	P _{вх} , Вт	P _{вих} , Вт	ККД, %
5	4.32	19.4	18.7	96.4
10	4.38	19.7	19.1	97
15	4.39	19.8	19.3	97.5
20	4.4	19.8	19.4	97.8
30	4.4	19.8	19.4	97.8
50	4.41	19.8	19.4	97.8
100	4.41	19.8	19.4	97.8

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot t_{\text{відкр. кл.}} / T = 9 \cdot 0,48 = 4,32 \text{ В,}$$

де $t_{\text{відкр. кл.}}$ – тривалість імпульсів на виході генераторів, T – період слідування імпульсів.

Однак при вимірюванні вихідної напруги при ємностях конденсаторів ≥ 50 мкФ було отримано значення 4.41 В. Таке збільшення відносно розрахованого значення пояснюється тим що тривалість фронтів і спадів імпульсів керування в наведених моделях складає 10 нс, що достатньо для виникнення наскрізних струмів ключів.

Ємність конденсаторів зумовлена не тільки опо-

ром відкритих ключів а і опором навантаження, підключеного до виходу перетворювача. Це пояснюється тим, що струм зарядки "плаваючого" конденсатора ділиться між струмом зарядки вихідного конденсатора і струмом навантаження. Знайти значення ємності конденсаторів такого перетворювача енергії простіше всього шляхом моделювання.

При збільшенні вхідної напруги перетворювача до 20 В і опорі навантаження 0.8 Ом вихідна потужність складає 121.8 Вт, а ККД = 98.7% (для моделі наведеної на рис. 5).

Звісно, що отримані результати показують тільки потенційні можливості таких перетворювачів. Для порівняння з перетворювачами з котушками потрібно провести моделювання DC/DC-перетворювача з найбільш високою потенційною ефективністю. У [3] проведено дослідження перетворювачів постійної напруги з різними топологіями. За результатами моделювання найбільш ефективним є синхронний перетворювач, який має ще й найнижчий рівень створюваних ЕМЗ.

Структурна схема понижувального синхронного перетворювача наведена на рис. 6. Для порівняння рівня електромагнітних завад, створюваних пере-

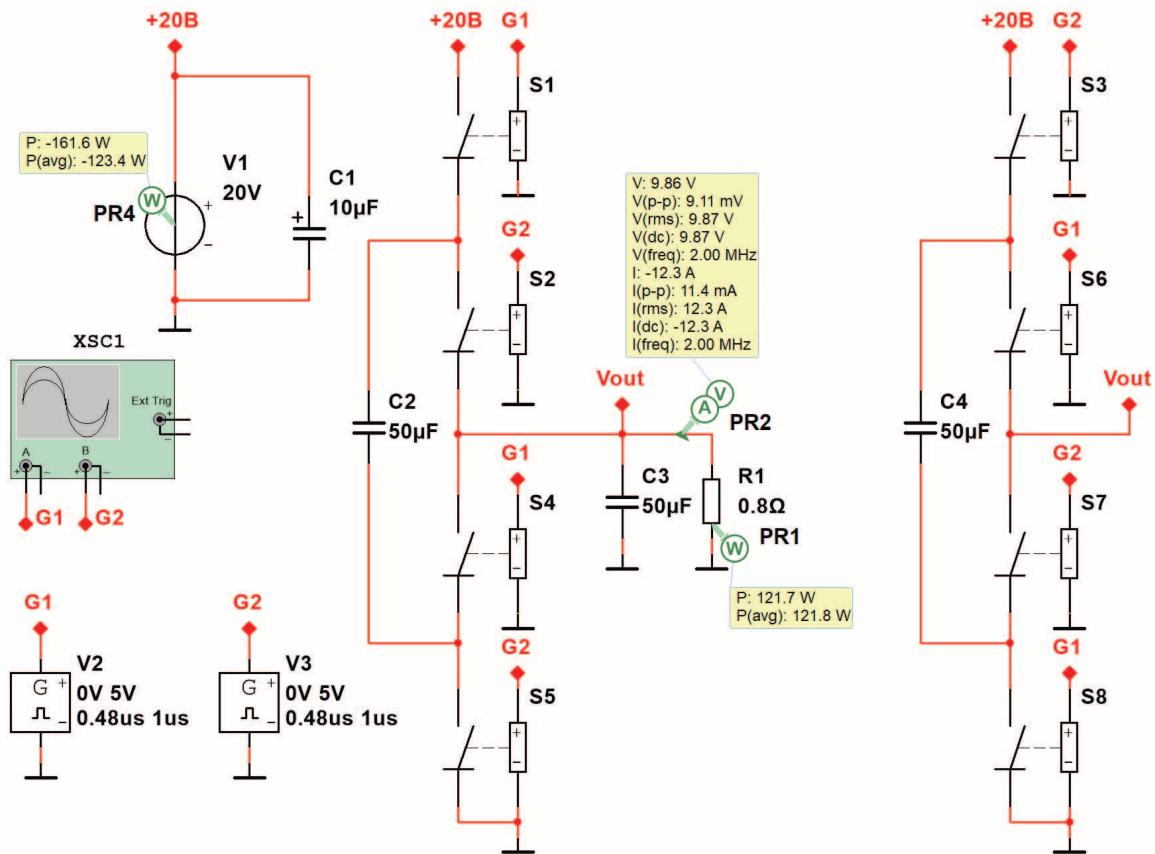


Рис. 5. Модель перетворювача з комутованими конденсаторами при напрузі джерела живлення 20 В

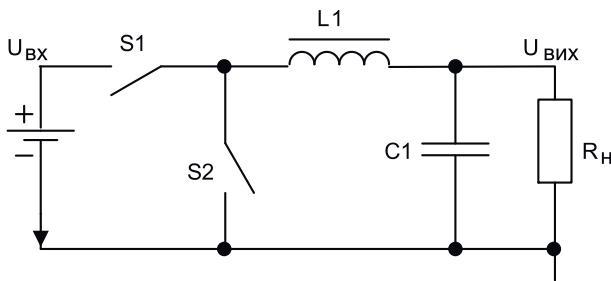


Рис. 6. Структурна схема понижувального синхронного перетворювача

творювачами з комутованим конденсатором та синхронного з використанням котушки індуктивності, проведемо моделювання рівня ЕМЗ в середовищі LTspice. Такий вибір зумовлений розширеними можливостями вимірювання спектрів складних сигналів у цьому середовищі.

Для вимірювання рівня ЕМЗ синхронного перетворювача створена модель (рис. 7), яка має параметри вихідного сигналу аналогічні параметрам перетворювача з комутованим конденсатором.

Оскільки метою дослідження є порівняння рівня ЕМЗ та ККД DC/DC-перетворювачів з різними топологіями, то вплив параметрів силових ключів та ко-

тушки індуктивності потрібно виключити. Тому у моделях використані ідеалізовані елементи, параметри яких не змінюються при зміні струму або напруги, а задаються користувачем.

Директивою **.tran** задається початок, тривалість процесу моделювання та час початку збереження отриманих результатів. Для досліджуваних перетворювачів вимірювався час перехідного процесу. Потім час початку збереження результатів задавався більшим за тривалість перехідного процесу.

Для вимірювання часу перехідного процесу задається нульовий час затримки збереження результатів моделювання і по часових діаграмах сигналів знаходилась тривалість перехідного процесу. На етапі дослідження ККД та рівня ЕМЗ час початку збереження результатів задається в 1,2 рази більше часу перехідного процесу. Директивою **.model** задаються основні параметри ключів (SW). Для моделювання використані ідеалізовані ключі з внутрішнім опором 10 мОм.

Директива **.four** дозволяє виконати аналіз Фур'є сигналів вхідного струму перетворювача I(V1) та вихідної напруги VOUT. За допомогою директиви **.meas** обчислюється ККД перетворювача шляхом

Налаштування симуляції Директиви вимірювань

```
.tran 0 40m 20m startup
.model SW SW(Ron=0.01 Roff=1Meg Vt=0.5)
```

```
.four 50 10 50 I(V1)
.meas Pin AVG -I(V1)*V(IN)
.meas Pout AVG I(R1)*V(OUT)
.meas eff param Pout/Pin
```

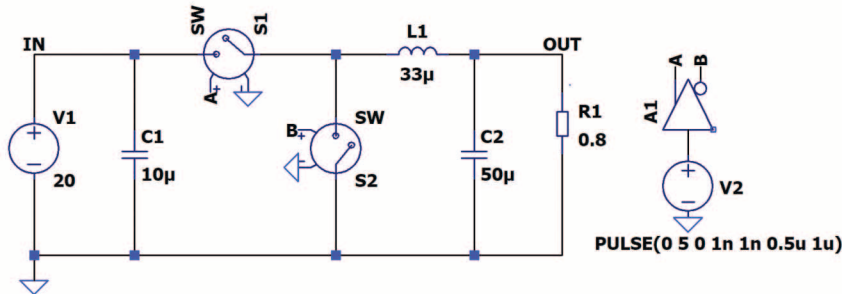


Рис. 7. Модель синхронного понижувального перетворювача з вихідною напругою 10 В і опором навантаження 0.8 Ом

обробки отриманих при симуляції вихідних даних. Результат присвоюється змінній **eff**, що відповідає співвідношенню середньоквадратичного значення потужності, що споживається навантаженням, до потужності, що споживається від джерела живлення у відповідності з формулою $eff = P_{out}/P_{in}$.

Для коректного порівняння результатів моделювання значення вихідної напруги та струму навантаження задаються однаковими для обох типів перетворювачів і становлять – $U_{вх} = 20$ В, $U_{вих} = 10$ В, опір навантаження 0.8 Ом.

Часові діаграми сигналів вхідного струму та вихідної напруги синхронного перетворювача наведені на рис. 8.

Результати розрахунків вхідної та вихідної потужності формуються у файлі SPICE Output Log (рис. 9).

Фрагмент файлу SPICE Output Log з результатами обчислення вхідної і вихідної потужності та ККД перетворювача наведені на рис. 10.

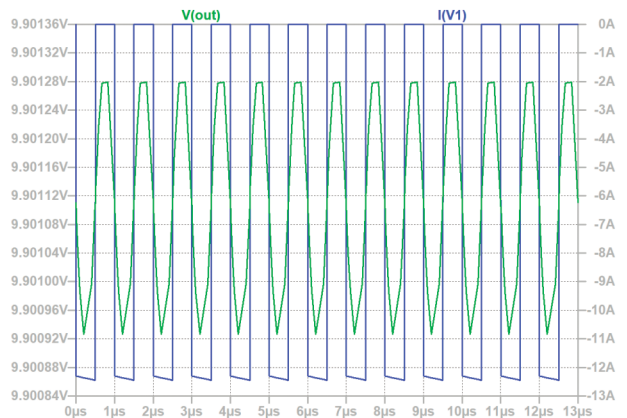


Рис. 8. Часові діаграми сигналів вхідного струму (синя) та вихідної напруги синхронного перетворювача

Як випливає з рис. 10, ККД такого перетворювача потенційно може сягати 98,64%.

Спектри струму джерела живлення та вихідної

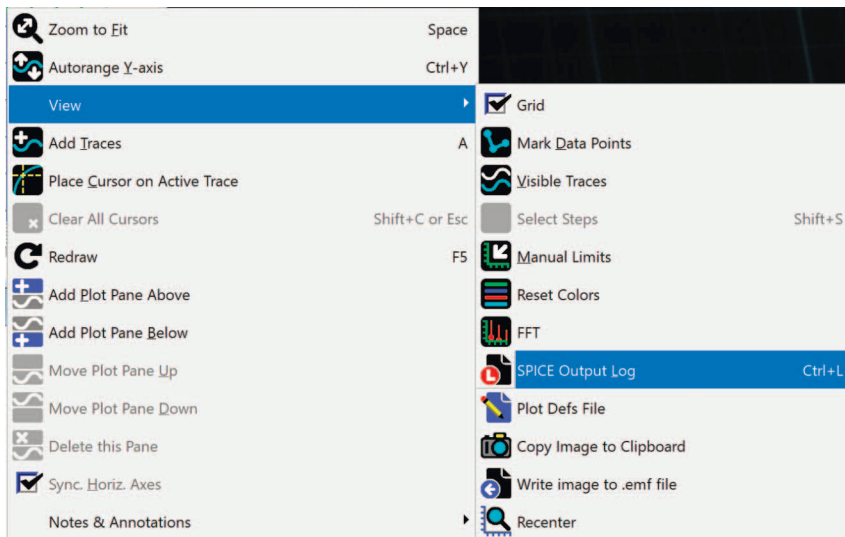


Рис. 9. Виклик файлу SPICE Output Log у вікні програми LTspice

```
Pin: AVG(-I(V1)*V(IN))=124.225313729 FROM 0 TO 0.02
Pout: AVG(I(R1)*V(OUT))=122.539965227 FROM 0 TO 0.02
eff: Pout/Pin=0.986433131447
Fourier components of I(V1)
```

Рис. 10. Фрагмент файлу SPICE Output Log з результатами обчислення вхідної і вихідної потужності та ККД синхронного перетворювача

напруги синхронного перетворювача наведені на рис. 11 та 12, відповідно.

Для порівняння з параметрами перетворювача з комутованим конденсатором створена його модель у середовищі LTSpice, що наведена на рис. 13.

Часові діаграми сигналів вхідного струму та вихідної напруги перетворювача з комутованим конденсатором наведені на рис. 14.

Фрагмент файлу SPICE Output Log з результатами обчислення вхідної і вихідної потужності та ККД перетворювача з комутованим конденсатором наведені на рис. 15.

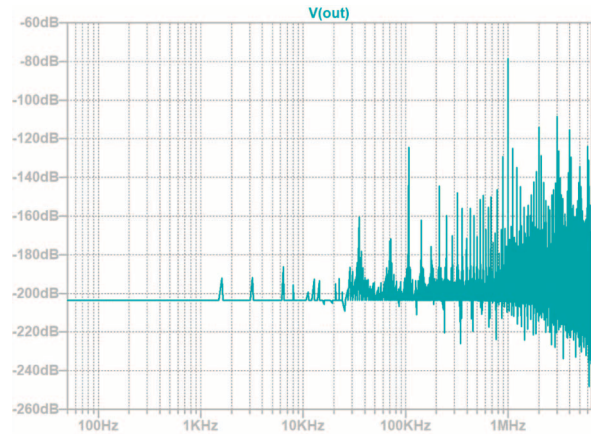


Рис. 12. Спектр вихідної напруги синхронного понижувального перетворювача

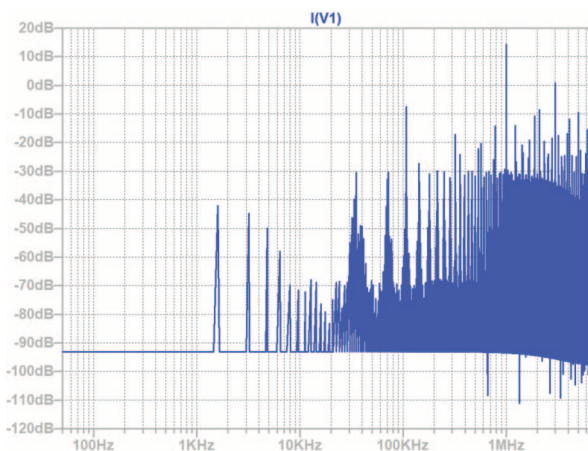


Рис. 11. Спектр струму споживаного від джерела живлення синхронним понижувальним перетворювачем

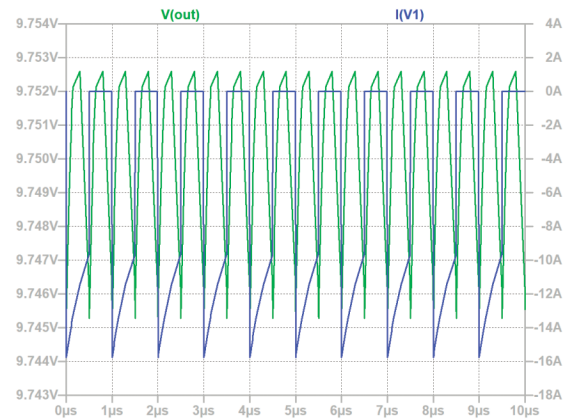


Рис. 14. Часові діаграми сигналів вхідного струму (синя) та вихідної напруги перетворювача з комутованим конденсатором

Як випливає з рис. 15, ККД такого перетворювача потенційно може сягати 97,52%. У порівнянні з синхронним перетворювачем, що має потенційний ККД 98,64%, це трохи нижчий результат.

Для досягнення більш високого ККД потрібно

Налаштування симуляції

```
.tran 0 40m 20m startup
.model SW SW(Ron=0.01 Roff=1Meg Vt=0.5)
```

Директиви вимірювань

```
.four 50 10 50 I(V1)
.meas Pin AVG -I(V1)*V(IN)
.meas Pout AVG I(R1)*V(OUT)
.meas eff param Pout/Pin
```

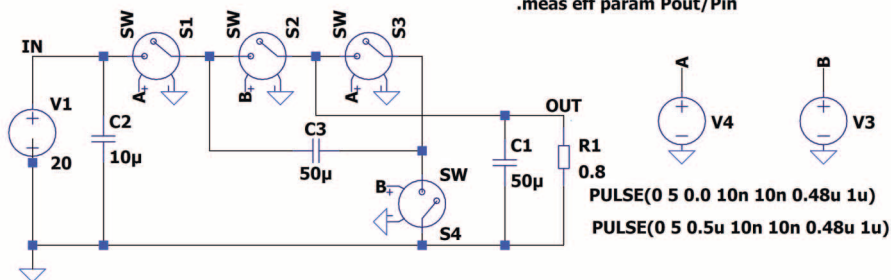


Рис. 13. Модель понижувального DC/DC-перетворювача з комутованим конденсатором

Pin: $\text{AVG}(-I(V1)*V(IN))=121.853370022$ FROM 0 TO 0.02
 Pout: $\text{AVG}(I(R1)*V(OUT))=118.832598582$ FROM 0 TO 0.02
 eff: $\text{Pout}/\text{Pin}=0.975209783373$
 Fourier components of I(V1)

Рис. 15. Фрагмент файлу SPICE Output Log з результатами обчислення вхідної і вихідної потужності та ККД перетворювача з комутованим конденсатором

використати два перетворювачі працюючих у протифазі на одне навантаження (як показано на рис. 5).

Спектри струму джерела живлення та вихідної напруги перетворювача з комутованими конденсаторами наведені на рис. 16 та 17, відповідно.

Порівнюючи спектри струмів синхронного перетворювача та перетворювача з комутованим конденсатором, можна зробити висновок про те, що вони практично однакові. У спектрі вихідної напруги синхронного перетворювача всі складові мають

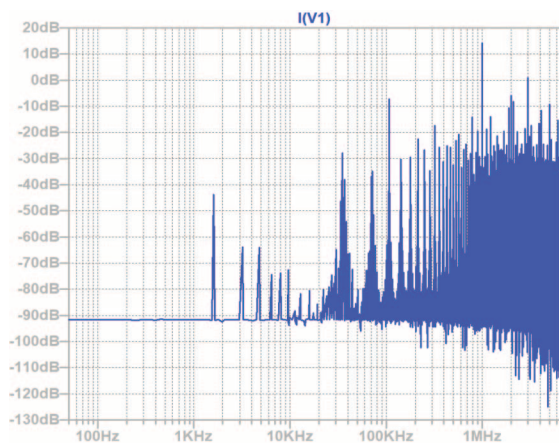


Рис. 16. Спектр струму споживаного від джерела живлення понижувальним перетворювачем з комутованим конденсатором

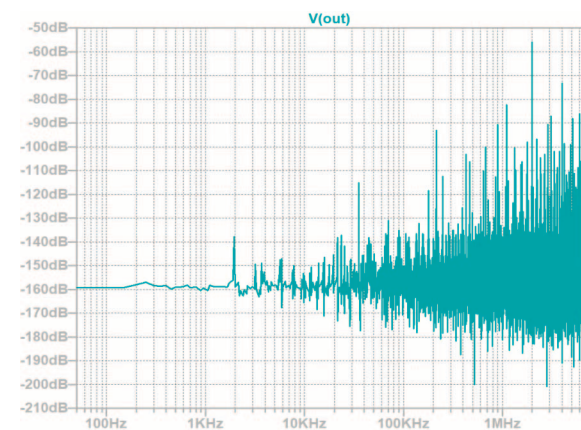


Рис. 17. Спектр вихідної напруги понижувального перетворювача з комутованим конденсатором

рівень приблизно на 20 дБ нижчий за рівень аналогічних складових перетворювача з комутованими конденсаторами.

При опорі ключів 0,1 Ом у перетворювача з комутованим конденсатором ККД знижується з 97.52% до 79,9%, а синхронного перетворювача з 98.64% до 88.7%.

З проведених досліджень можна зробити висновок про те що перетворювачі з комутованими конденсаторами не мають переваг у порівнянні з синхронним понижувальним перетворювачем з котушкою індуктивності.

Чутливість до опору відкритих силових ключів набагато вища у перетворювачів з комутованим конденсатором.

Кількість елементів при однаковій ефективності перетворювачів значно більша у перетворювачів з комутованим конденсатором.

Для досягнення ККД 98.7% потрібно використати 8 ключів і 3 конденсатора у перетворювачі з комутованими конденсаторами, а у синхронному перетворювачі ККД 98.64% досягається при використанні двох силових ключів, 1 котушки індуктивності і 1 конденсатора.

Рівень створюваних на вході кондуктивних електромагнітних завад практично однаковий

Тобто ствердження про те що перетворювач з комутованим конденсатором має більш високий ККД і щільність потужності в порівнянні з перетворювачами на основі котушок індуктивності без вказання топології перетворювача з котушкою некоректні. І рішення про використання того або іншого типу перетворювача треба приймати після детального аналізу і моделювання таких перетворювачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ultra-Fast USB Battery Charging With Power Dense Switched-Cap Converters. Analog Design Journal, 4Q 2021. / <https://www.ti.com/lit/an/slyt819/slyt819.pdf?ts=1742115642332>
2. Стандарт USB Power Delivery: что нужно знать о популярной системе зарядки мобильных устройств. / https://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=208181
3. Макаренко В. В., Лукашев О. Ю. Влияние топологии DC/DC-перетворювача на рівень створюваних електромагнітних завад. DOI 10.32838/2663-5941/2020.2-2/39. ISSN: 2663-5941.