

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І.МЕЧНИКОВА

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютерних систем та технологій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

« Широтно-імпульсно-модульоване перетворення живлення постійного струму в постійний »

« Pulse-width-modulated conversion of direct current to direct current »

Виконала: здобувачка заочної форми навчання

спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

(код, назва спеціальності)

Освітня програма ОП - Комп'ютерна інженерія

(назва)

Данильчак Олена Ігорівна

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник канд. ф-м. н., доц. Шугайло Ю.Б.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент д.т.н., проф. Гунченко Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:

Протокол засідання кафедри

№ від « » 2024 р.

Завідувач кафедри

Юрій ГУНЧЕНКО

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК №

Протокол № від « » 2024 р.

Оцінка / /

(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Голова ЕК

Алла КОБОЗЄВА

(підпис)

(прізвище, ім'я)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра за темою «Моделювання роботи PWM перетворювача живлення DC/DC» присвячена вивченню роботи імпульсного джерела живлення з ШІМ керуванням.

Тема вторинного живлення є надзвичайно актуальною для комп'ютерної техніки. Особливо для компактної техніки таких як ноутбуки. Вторинні джерела живлення мають низку специфічних вимог таких як висока якість електричних параметрів, стійкість до перешкод і врешті решт габарити.

Моделювання проводилося в пакеті схемотехнічного моделювання LTSpice. Знайомство і прийоми роботи в якому наведено в першому розділі.

У розділі 2 проведено огляд конструкцій блоків живлення, проведено порівняння їхніх характеристик залежно від типів та режимів роботи. Особлива увага приділено імпульсним блокам живлення як прикладу сучасного стандарту в галузі енергопостачання.

В останньому розділі надана інформація про результати практичного моделювання імпульсних блоків живлення.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work on the topic "Simulation of PWM operation of a DC/DC power converter" is devoted to the study of the operation of a pulsed power source with PWM control.

The topic of secondary power supply is extremely relevant for computer technology. Especially for compact equipment such as laptops. Secondary power sources have a number of specific requirements, such as high quality electrical parameters, resistance to interference and, ultimately, dimensions.

The simulation was carried out in the circuit simulation package LTSpice. Acquaintance and methods of work in which are given in the first chapter.

Chapter 2 provides an overview of power supply unit designs, compares their characteristics depending on types and modes of operation. Special attention is paid to pulsed power supply units as an example of a modern standard in the field of energy supply.

The last section provides information on the results of practical modeling of pulsed power supply units.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗНАЙОМСТВО З ПАКЕТОМ МОДЕЛЮВАННЯ LTSPICE.....	8
1.1 Завантаження готових схем та модулювання їх роботи	8
1.2 Отримання графіків та прийоми роботи з ними	11
2 ІМПУЛЬСНІ БЛОКИ ЖИВЛЕННЯ: КОНСТРУКЦІЇ ТА ФУНКЦІЇ	16
2.1 Блоки живлення як компоненти електронної системи	16
2.2 Неізолювані блоки живлення.....	28
2.3 Ізолювані блоки живлення	30
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІМПУЛЬСНИХ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ У СИСТЕМІ LTspice.....	35
3.1 Моделювання і дослідження спрощеної схеми широтно-імпульсного модулятора	36
3.2 Моделювання схеми синхронного ШІМ перетворювача	40
ВИСНОВОК.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

Перелік скорочень, умовних позначень і термінів

AC	– Alternating Current (змінний струм)
Average	– Середнє значення
DC	– Direct Current (постійний струм)
E.M.F	– Electromotive Force (електрорушійна сила)
MOSFET	– Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
PWM	– Pulse Width Modulation (широотно-імпульсна модуляція)
RMS	– Root mean square (середньоквадратичне значення для напруги та струму)
SMPS	– Switched Mode Power Supplies (імпульсні джерела живлення)
ШИМ	– Широотно-імпульсна модуляція

ВСТУП

В управлінні джерелами живлення існують два основні типи: лінійний та імпульсні джерела живлення. Вибір між використанням імпульсного або лінійного джерела живлення в конкретному проекті значною мірою залежить від потреб самого застосування.

Лінійне джерело живлення пропонує три основні переваги.

Перша перевага – його простота. Можна придбати цілий лінійний регулятор в одному корпусі і просто додати два фільтруючі конденсатори для зберігання та стабільності.

Друга основна перевага – його безшумна робота та здатність обробки навантаження. Лінійний регулятор генерує мало або зовсім не створює електричний шум на виході, але динамічний час відгуку на навантаження дуже короткий.

Третя перевага полягає в тому, що для вихідної потужності менше приблизно 10 Вт його вартість компонентів і виробництва нижча, ніж у імпульсного імпульсного регулятора.

Недоліки лінійного регулятора обмежують його сферу застосування.

По-перше, його можна використовувати тільки як знижуючий регулятор, що означає, що вхідна напруга повинна бути принаймні на 2-3 В вище, ніж потрібна вихідна напруга.

По-друге, кожен лінійний регулятор може мати лише один вихід. Таким чином, для кожної додаткової вихідної напруги потрібно додати окремий лінійний регулятор.

Ще одним великим недоліком є середня ефективність лінійних регуляторів. У звичайних додатках лінійні регулятори мають ефективність від 30 до 60 відсотків.

Імпульсний регулятор оминає всі недоліки лінійного регулятора.

По-перше, імпульсні джерела забезпечують ефективність від 68 до 90 відсотків незалежно від вхідної напруги.

По-друге, вихідна напруга не залежить від вхідної напруги. Це означає, що вхідна напруга може бути більшою або нижчою рівня вихідної напруги без впливу на роботу джерела живлення. Останньою важливою перевагою є його розмір та вартість.

Недоліки імпульсного джерела живлення незначні і можуть бути усунені вибором більш досконалої схеми. Імпульсні джерела живлення використовуються в ситуаціях, де необхідна висока ефективність живлення, таких як акумуляторні та портативні програми, де важливі термін служби батарей та внутрішні та зовнішні температури.

Оскільки портативні пристрої, що працюють від батарей і мають безліч функцій, стають популярними, режим перетворювача постійного струму в постійне, що перемикається, є ключовим функціональним блоком через його високу ефективність.

Метою дипломної роботи є моделювання джерела живлення з ШІМ модулятором.

- Створення бібліотечного елемента імпульсного генератора ШІМ модуля і інтегрування його в пакет.
- Визначення залежності вихідної напруги від коефіцієнта заповнення Q.

Інструментом моделювання обрано пакет LTSpice корпорації Analog Device. Який має безкоштовну ліцензію FREE.

Обраний пакет простий в засвоєнні. Достатньо потужний для моделювання складних характеристик електронних систем. Крім того він постійно оновлюється виробником.

1 ЗНАЙОМСТВО З ПАКЕТОМ МОДЕЛЮВАННЯ LTSPICE

У наш час любителю та професіоналу доступна велика кількість програм для персонального комп'ютера, що дозволяють проводити моделювання роботи електронних схем. Найчастіше ці програми використовують різні базові математичні алгоритми, що дає їм певні переваги під час моделювання певного типу електронних пристроїв. Найбільшою популярністю користуються програми, що використовують SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) алгоритм моделювання процесів, що протікають в електронних схемах. Алгоритм SPICE, розроблений наприкінці 70-х років в університеті Берклі (Каліфорнія), став стандартом для комерційних систем схемотехнічного моделювання, що розробляються і вже експлуатуються в даний час для персонального комп'ютера.

Ми зупинимо свій вибір на LTspice [1,2,3]. Ця програма є досить універсальною і дозволяє створювати нові бібліотечні елементи, редагувати схемні рішення, моделювати і переглядати його результати. У програмі є вбудована бібліотека моделей більшості мікросхем DC-DC перетворювачів, які випускають корпорація Linear Technology.

1.1 Завантаження готових схем та модулювання їх роботи

Знайомство з пакетом можна почати з завантаження готової моделі імпульсного підвищуючого Step-Up перетворювача на мікросхемі LT1109.

При запуску програми LTspice відкривається вікно оболонки вздовж верхнього краю якого розташований рядок меню та панель інструментів під нею (рис.1.1).

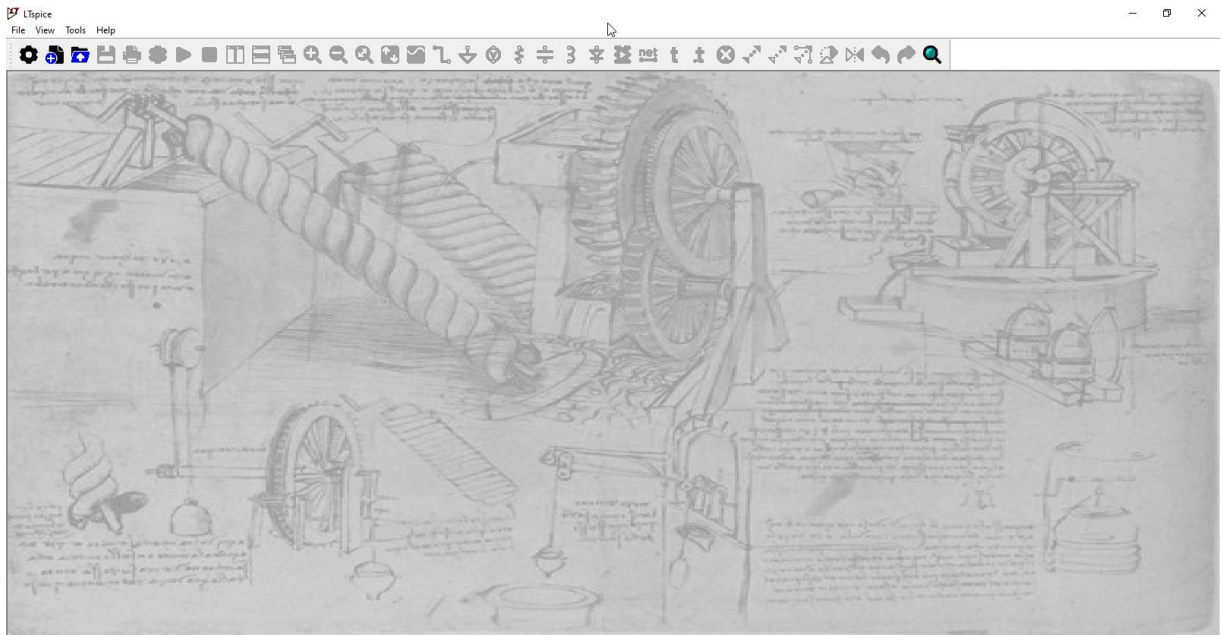


Рисунок 1.1 Робоче поле, рядок меню та панель інструментів

Недоступні в даний момент інструменти мають сіре забарвлення.

Тепер можна загрузити модель LT1109 одним из двух способів:

- Обрати команду меню File → Open Examples та вказати шлях до файлу 1109.asc.
- Обрати команду меню File → New Schematic. В результаті відкриється порожнє вікно програми. Далі протрібно виконати наступну послідовність дій:
 - 1) Натиснути на панелі інструментів кнопку Component. У вікні вибору компонентів, що відкрилося, ми бачимо список елементів та бібліотек.
 - 2) Відкрити бібліотеку Power Products та знайти елемент LT1109.
 - 3) Обираємо елемент LT1109 та натискаємо Open Example Circuit. У результаті відкриється вікно зі схемою імпульсного підвищуючого перетворювача на мікросхемі LT1109

Схема наведена на рис. 1.2.

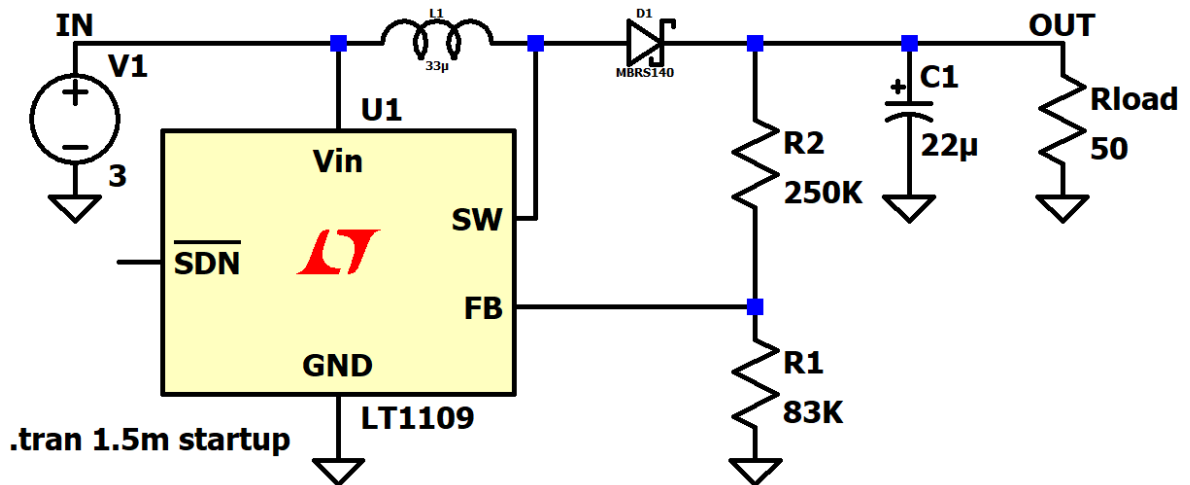


Рисунок 1.2 Схема підвищуючого перетворювача напруги на LT1109

Схема містить мінімальну кількість елементів:

- джерело живлення $V1 = 3\text{ В}$;
- мікросхема $U1 = \text{LT1109}$;
- індуктивність дроселя перетворювача $L1 = 33\text{ мкГн}$;
- діод $D1 = \text{MBRS140}$ (діод Шотткі);
- конденсатор вихідного фільтра $C1 = 22\text{ мкФ}$;
- дільник напруги зворотного зв'язку на резисторах $R1 = 83\text{ кОм}$ та $R2 = 250\text{ кОм}$;
- опір $R_{\text{load}} = 50\text{ Ом}$, що імітує навантаження перетворювача.

Під схемою розташований текстовий напис, який починається з точки `.tran 1.5m startup`. Це директива для програми модулювання, яка вказує на умови модулювання.

В нашому випадку директива `.tran 1.5m startup` означає наступне:

- `tran 1.5m` – розрахувати перехідний (transient) процес тривалістю 1,5 мс;
- `startup` – вважати, що напруга живлення змінюється від нуля у момент початку модулювання.

Для запуску процесу модулювання потрібно обрати команду меню `Simulate – Run` або натиснути кнопку `Run` на панелі інструментів.

З початком роботи програми вікно схеми зменшиться та з'явиться вікно графіків. Вікно графіків має горизонтальну шкалу часу та має назву 1109.raw.

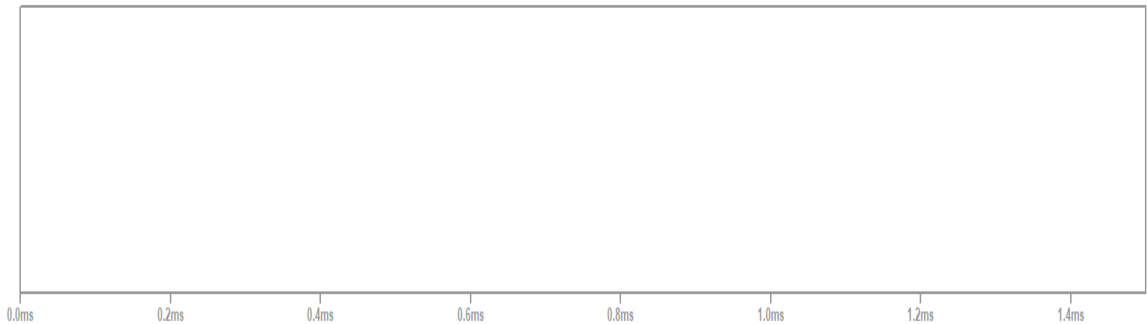


Рисунок 1.3 Вікно графіків

1.2 Отримання графіків та прийоми роботи з ними

Після завершення або в процесі моделювання можна вибрати графіки змін напруги, струму, миттєвої потужності та інших у певних точках схеми [2,3]. Для цього потрібно активізувати вікно схеми: натиснути на ім'я вікна і підвести покажчик до точки схеми або елемента, що цікавить.

Показчик набуває форми щупа осцилографа при наведенні на вузол або провідник, або струмових кліщів при наведенні на елемент чи його вивід.

Наведення щупу на провідник виводу OUT на схемі та натискання на нього дає графік зміни напруги $V(out)$ на виході схеми у часі.

Наведення показчика на лінію графіка схеми дає можливість прочитати значення координат курсора: x – час, y – напруга.

При наведенні та натисканні струмових кліщів на індуктивність $L1$, з'являється графік зміни струму індуктивності $I(L1)$ у часі.

Для оцінювання потужності, що виділяється на навантаженні $Rload$, потрібно навести показчик на резистор навантаження та натиснути клавішу "ALT". Показчик набуде вигляду термометру. При натисканні із зажатою

клавiшею “ALT”, на графіку з’явиться крива із заголовком $V(\text{out}) \cdot I(\text{Rload})$ – значення миттєвої потужності. Використання зображення термометру для позначення потужності обумовлено тим, що потужність, яка виділяється на елементі, визначає його температуру.

Для зручності роботи з графіками краще розгорнути вікно графіка та використовувати інструмент Zoom (Лупа) для детального аналізу окремої ділянки графіка.

Для відображення “загублених” елементів, які не помістилися по висоті, можна задати автоматичний вибір діапазону по вертикальній шкалі. Для цього після натискання правою клавiшею миши на полі графіка у меню, яке з’явилося, треба обрати пункт Autorange Y-axis. Графік розтягнеться на діапазон від мінімального до максимального значень.

Для розділення окремих залежностей графіків з метою збільшення наочності можливо додати додаткове порожнє поле графіка за допомогою команди Add Plot Pane, яку можна знайти при натисненні правої клавiши миші на полі графіку (рис.1.4). Після цього до нового поля можливо додати будь-який графік або перетягнути з першого поля заголовок графіка у нове поле.

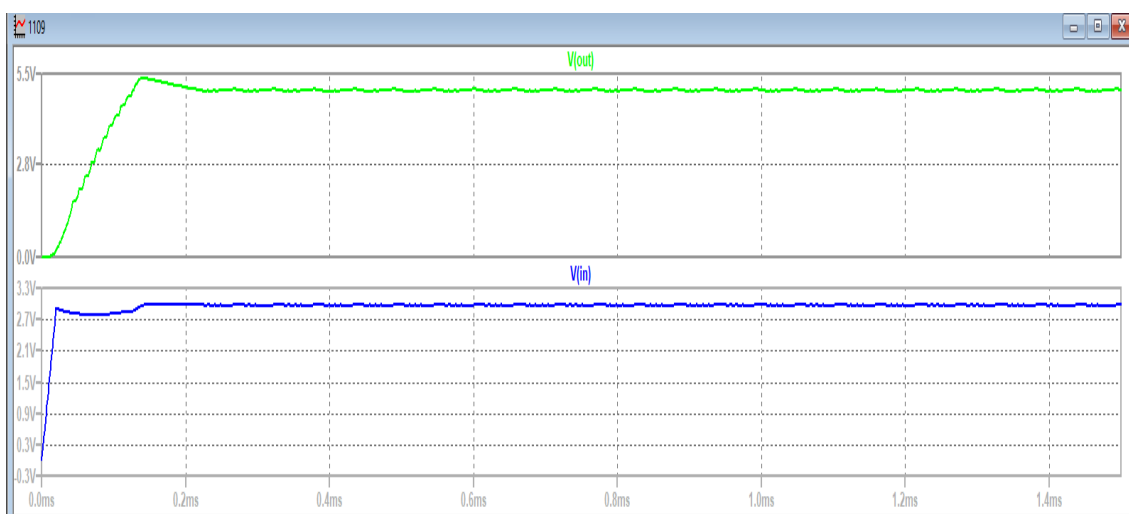


Рисунок 1.4 Розділення графіків вихідної та вхідної напруги на два поля.

Для подальшого покращення вигляду графіків можна включити координатну сітку та вручну задати діапазони та крок по вертикальних осях. Для цього натискаємо правою клявішею миші у полі графіку та обираємо пункт Grid (Сітка) та наступним кроком обираємо Manual Limits (Діапазон вручну). У вікні Vertical Axis (Вертикальна вісь) задаємо: Top (Верхня межа), Tіc (Крок шкали) та Bottom (Нижня межа). За необхідності можливо задати логарифмічну шкалу.

Експорт графіка чи схеми в інший документ можливо виконати за допомогою команди меню Tools – Copy bitmap to Clipboard. Ця команда зберігає лише поле графіка без рамки вікна програми.

Для видалення кривих на графіках можна скористатися одним із способів:

- 1) Написнути праву клявішу миші на заголовок кривої та у вікні, що з'явилося, обрати клявішу Delete this Trace (Видалити цю криву);
- 2) Натиснути клявішу “Delete” та навести ножиці на заголовок досліджуваної кривої та натиснути на неї. Після завершення необхідних операцій необхідно натиснути праву клявішу миші або клявішу “Esc”.

Видалення додаткових полів графіків можливо за допомогою наступних способів:

- 1) Активізувати вікно графіка та обрати команду меню Plot Settings – Delete Active Pane;
- 2) Натиснути правою клявішею миші всередині графіка та обрати в контекстному меню команду Delete this Panel.

Для збереження налаштувань графічного вікна (перелік точок вимірювання та розміщення графіків у графічному вікні) доцільно створити спеціальний файл з розширенням .plt.

Це можливо зробити скориставшись командою меню:

File – Save Plot Settings або Save –Plot Settings as.

Ім'я файлу налаштувань повинно збігатися із ім'ям ASC-файла схеми та розташовуватися в одній папці зі схемою.

Для вимірювання інтервалів амплітуд та часу на графіку потрібно виконувати наступні дії:

- 1) Натиснути правою клавiшею миші на заголовок досліджуваної кривої та задати два курсори: Attached Cursor – 1st & 2nd.
- 2) Перетягнути вертикальні маркери в потрібні точки кривої. Значення – в області маркерів: Cursor1, Cursor2; інтервали – в області Diff (Cursor2 - Cursor1) (див. рис1.5).

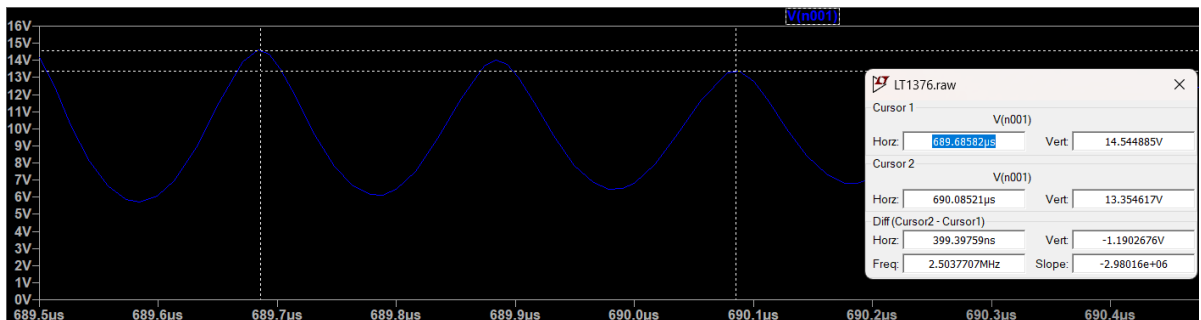


Рисунок 1.5 Вікно параметрів у точках двох параметрів та їх різностей.

Для вимірювання середніх значень потрібно натиснути правою клавiшею миші на заголовок досліджуваної кривої з одночасно натисненою клавiшею “Ctrl”. У вікні, що з’явилося, показані усереднені значення:

- Interval Start – початок інтервалу усереднення;
- Interval End – кінець інтервалу усереднення;
- Average – середнє значення;
- Integral – інтеграл, робота для потужності;
- RMS – середньоквадратичне значення для напруги та струму.

Усереднення відбувається в межах видимого вікна (рис.1.6), тому потрібно обирати розміри вікна кратними періоду сигналу або обирати його ширину набагато більше періоду повторення сигналу, щоб знехтувати впливом кінців інтервалу.

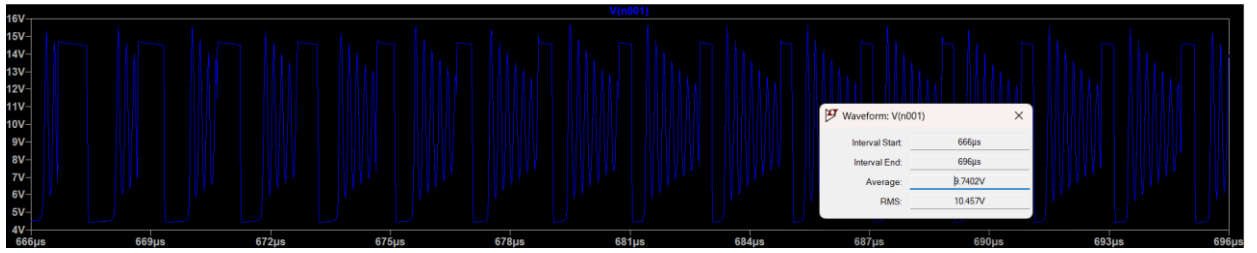


Рисунок 1.6 Приклад розрахунку середніх значень

2 ІМПУЛЬСНІ БЛОКИ ЖИВЛЕННЯ: КОНСТРУКЦІЇ ТА ФУНКЦІЇ

2.1 Блоки живлення як компоненти електронної системи

Блок живлення є електричний пристрій, що використовується для подачі живлення заданих характеристик на електричні навантаження [5,7].

Основна функція цього пристрою - зміна електричного струму джерела до заданої напруги, частоти та струму для подачі навантаження.

Йому притаманні наступні задачі:

- Передача електричної потужності з мінімумом втрат;
- Формування частоти відмінною від частоти струму джерела;
- Зміна величини напруги;
- Стабілізація. Блок живлення повинен на виході видавати стабільний струм і напругу. Ці параметри не повинні перевищувати або бути нижче певної межі;
- Захист від короткого замикання та інших несправностей в джерелі живлення, які можуть привести до проблем із виробом, яке забезпечує блок живлення;
- Гальванічна розв'язка. Метод захисту від протікання вирівнюють і інших струмів. Такі струми можуть приводити до поломок обладнання та вражати людей.

Іноді ці джерела живлення можна назвати перетворювачами електроенергії. Схеми блоку живлення класифікуються на різні типи залежно від потужності, яку вони використовують для забезпечення ланцюгів або пристроїв.

Серед блоків живлення найбільш поширені два типи, які розрізняються за конструкцією:

- лінійні (трансформаторні) блоки живлення.
- імпульсні блоки живлення

Лінійні блоки живлення більш поширені через переваги загальної

продуктивності. Ця технологія добре зарекомендувала себе, як доступна вже дуже багато років та ефективна

Лінійні блоки живлення менш ефективні в режимі комутації, ніж імпульсні блоки живлення. Але вони забезпечують найкращу продуктивність і тому використовуються у багатьох програмах, де шум має велике значення.

Основним напрямом використання лінійних блоків живлення є аудіовізуальні програми, підсилювачі hi-fi та ін.

Тут шум та перемикання перемикачів від блоків живлення в режимі комутації можуть спричинити проблеми. Імпульсні блоки постійно покращують продуктивність, але лінійні блоки живлення, як правило, використовуються впродовж більш довгого часу.

Лінійний регульований блок живлення - це тип блоку живлення, який регулює вихідну напругу за допомогою керуючого елемента серії пропускання (див. рис. 2.1).

Основний приклад елемента проходження серії - резистор.

Звичайно використовуються елементи передачі серії - ВJT або MOSFET в активному або лінійному режимі, які з'єднані послідовно з навантаженням.

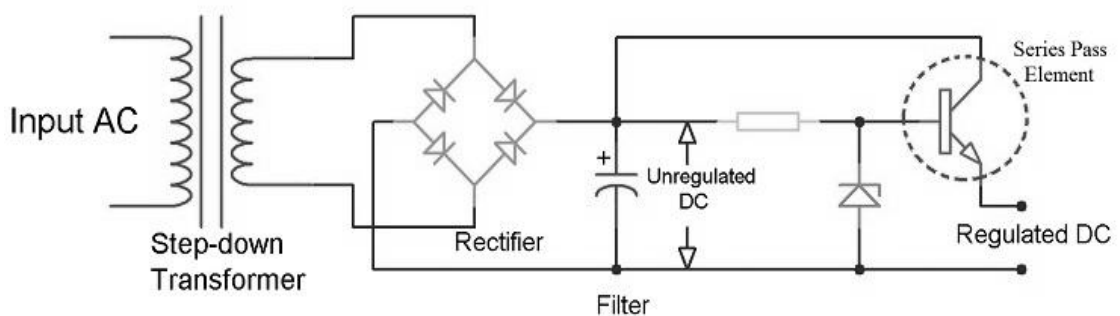


Рисунок 2.1 - Загальна схема лінійного блоку живлення

Залежно від змін або входу, або навантаження, струм через транзистор змінюється, щоб тримати напругу на виході постійною.

Різниця між вхідними та вихідними (навантажувальними) напругами падає через транзистор, і ця зайва потужність, тобто різниця між вхідною та вихідною (навантажувальною) потужністю, розсіюється транзистором як тепло.

Вхідне джерело змінного струму подається на випрямляч і фільтр для перетворення його в постійний струм.

Але ця подача постійного струму є нерегульованою, тому що вона може змінюватися зі змінами вхідних даних. Це нерегульоване джерело постійного струму подається як вхід до лінійного регулятора.

Імпульсний блок живлення (SMPS) - це тип регульованого блоку живлення, який використовує регулятор комутації високої частоти для перетворення блоку живлення, а також ефективно регулює вихід (див. рис. 2.2).

Регулятор комутації є транзистором (як силовий MOSFET) так само, як в лінійному регуляторі.

Різниця в тому, що прохідний транзистор в SMPS не постійно перебуває в стані насичення або повністю ввімкнений, а швидше перемикається між станами «повністю включено» і «повністю вимкнено» при дуже високих частотах. Звідси назва джерела живлення.

Середній час перемикаючого елемента імпульсного блоку живлення, тобто перебування транзистора в активному стані менше. Тому порівняно з лінійними регуляторами, кількість енергії, що витрачається або розсіюється, як тепло, менше. Це, в свою чергу, призводить до високої ефективності SMPS, оскільки падіння напруги через прохідний транзистор (або комутаційний елемент) набагато менша.

Дію комутації транзистора контролюють за допомогою методики, що називається модуляцією імпульсної ширини (ШІМ), а вихідна напруга може регулюватися робочим циклом ШІМ.

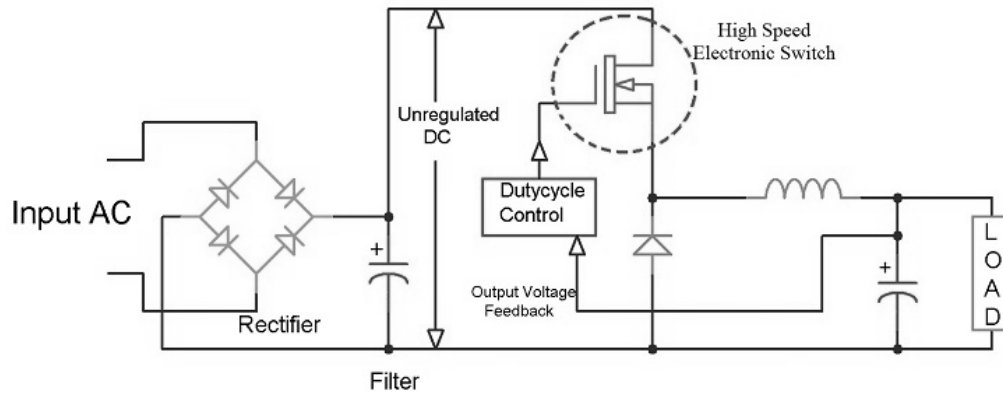


Рисунок 2.2 - Загальна схема імпульсного блоку живлення

У імпульсному блоку живлення нерегульоване джерело постійного струму подається в режим комутації «DC – to – DC», а на вихід - регульована подача постійного струму.

Основна відмінність структур лінійного регульованого живлення від джерела живлення, показаного тут, полягає в тому, що у випадку лінійного електроживлення вхід змінного струму зменшується, випрямляється та фільтрується, щоб отримати нерегульований постійний струм, а у випадку SMPS - вхід змінного струму безпосередньо випрямлюється і фільтрується, а нерегульований високовольтний постійний струм подається на високочастотний перетворювач « DC – to – DC».

Порівняльні характеристики лінійного та імпульсного блоків живлення наведено у таблиці 2.1.

Більшість електронних навантажень постійного струму постачаються зі стандартними блоками живлення, наприклад, батареями:

- мікропроцесори,
- мікроконтролери,
- світлодіоди,
- транзистори,
- ІМС,
- двигуни.

Таблиця 2.1 - Порівняння характеристик лінійного та імпульсного блоків живлення

Характеристики блоку живлення	Лінійний блок живлення	Імпульсний блок живлення
КПД	30-40%	Типову ефективність 60-95% можна досягти при хорошому дизайні
Вихідна напруга	Завжди менше, ніж на вході	Може бути більше або менше, ніж на вході
Метод регулювання	За рахунок розсіювання зайвої потужності	Змінюючи робочий цикл ШІМ
Складність схеми	Менш складний; складається з регулятора і фільтра як основних компонентів	Дуже складний; складається з перемикаючого елемента, високочастотного трансформатора, випрямлячів і фільтрів, ланцюга зворотного зв'язку
Шум і перешкоди	Менший електронний шум на виході і м'які високочастотні перешкоди	Високі перешкоди і шум через часте перемикання струму
Розмір і вага	Об'ємне через трансформатор та радіатора	Немає трансформатора на вході, але потрібен мініатюрний високочастотний трансформатор
Використання	Системи низької потужності	Високі потужності, складні вимоги

Проблемою в акумуляторах батареях є напруга: або занадто висока, або занадто низька.

SMPS забезпечить регульований вихід постійного струму.

SMPS - це універсальний блок живлення, оскільки ми можемо вибрати з різних типів блоків живлення з ізоляцією на вході та на виході, залежно від типу програми, таких як:

- «посилення» («посилення»),
- «пониження» («бак»).

В залежності від мети в застосування SMPS, ефективність конструкції SMPS може досягати 90% і навіть більше.

Ефективність лінійного блоку живлення залежить від напруги на

транзисторі проходу: якщо використано 3В літєвий елемент, який потрібно зменшити до напруги 1,8 В, подаючи струм 100 мА, потужність, що витрачається в транзисторі як тепло, становить 0,12 Вт - ефективність блоку живлення 40%.

ІМС SMPS мають усі функції дискретного дизайну SMPS, що дозволяє інженерам експериментувати з дизайном для індивідуальних проектів.

Конструкція блоку живлення з комутаційним режимом або SMPS - досить складна порівняно з лінійним блоком живлення.

Складність в дизайні має перевагу, оскільки призводить до стабільної та регульованої подачі постійного струму та здатності ефективно подавати більше енергії у відповідності заданим фізичним характеристикам (розмір, вага та вартість).

Спрощену блок-схему SMPS, що перетворює вхід змінного струму в регульований постійний струм представлено на рис. 2.3.

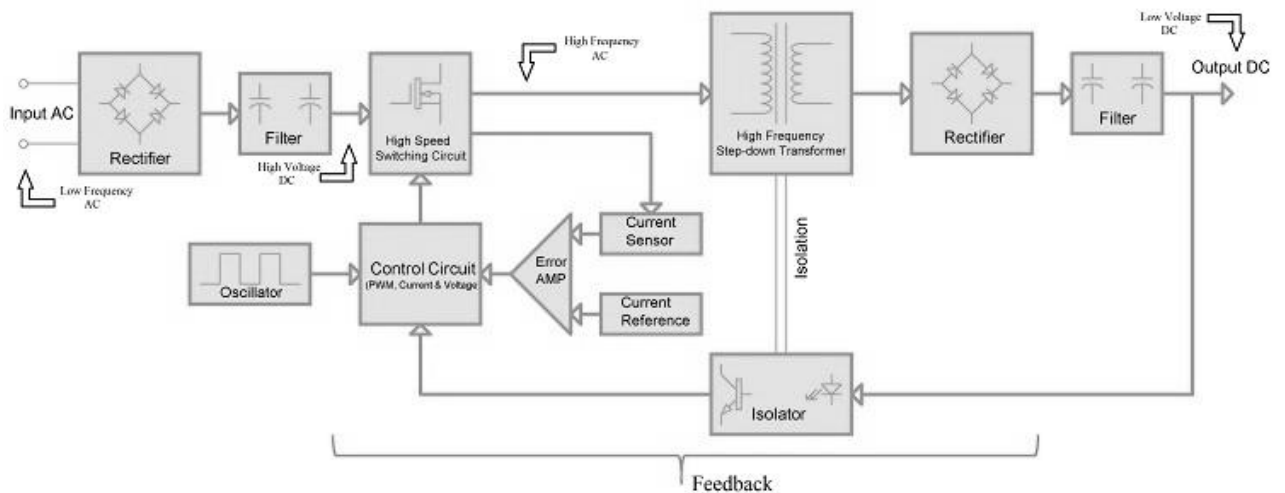


Рисунок 2.3 - Спрощена блок-схема SMPS, яка перетворює вхід змінного струму в регульований постійний струм

Хоча існує багато типів конструкцій для блоку живлення SMPS, всі конструкції подібної структури.

Основними типами SMPS є:

- AC to DC, де мережу змінного струму задають як вхід, і ми отримуємо регульований постійний струм на виході,
- Перетворювач «DC to DC Step up», де напруга постійного струму посилюється, тобто вихідна напруга більша за вхідну
- Перетворювач «DC to DC Step down», у якому вхідна напруга постійного струму зменшується, вихідна напруга менша або дорівнює вхідній напрузі.

У випадку SMPS систем постійного та постійного струму вхідний постійний струм зазвичай подається від акумулятора, отже, обидва ланцюга перетворювача постійного струму в постійний струм (Крок і Крок вниз) зазвичай зустрічаються в системах, що працюють на акумуляторах.

У дизайні SMPS представлено типовий перетворювач змінного струму в постійний струм.

Змоделюємо роботу конструкції SMPSE:

Вхід змінного струму подається на випрямний контур та контур фільтру.

Контур перетворюють змінний струм високої напруги в постійний струм високої напруги.

Високовольтний постійний струм подається елементу комутації високої швидкості, як силовий MOSFET.

Вихід цього перемикача MOSFET, який є високочастотним, високовольтним пульсуючим змінного струму, задається високочастотним кроковим трансформатором.

Вихід цього трансформатора - це сигнал низької напруги змінного струму, який в свою чергу подається на випрямляч і ланцюг фільтра для отримання постійного струму низької напруги.

Загальною особливістю будь-якої конструкції SMPS є перетворення вхідного змінного струму у високовольтний постійний струм та перетворення цього постійного струму високої напруги у високу напругу,

високу частоту квадратної хвилі змінного струму.

Ця змінна струму високої напруги та частоти перетворюється на регульований постійний струм.

Квадратний хвильовий осцилятор і високошвидкісний електронний комутатор (як MOSFET) відповідають за перетворення постійного струму в високовольтний змінного струму. Цей же принцип використовується і в квадратних хвильових інверторах.

Перетворення вхідного змінного або постійного струму (після випрямлення та фільтрування змінного струму) в змінного струму високої частоти розмір і ціна компонентів, таких як індуктори, трансформатори та конденсатори, можуть зменшуватися, тобто вони можуть бути меншими і дешевшими.

Оскільки сигнал високої частоти змінного струму, що генерується на комутаторі, є квадратною хвилею, вихідну напругу можна регулювати за допомогою модуляції імпульсної ширини (ШІМ). Відбувається зворотний зв'язок напруги через ланцюг ізолятора до ланцюга управління (який керує ШІМ).

За допомогою цього зворотного зв'язку робочий цикл ШІМ від осцилятора може змінюватись, а отже, вихід ідеально регулюється без зайвих напруг.

Струмовий зразок від високої частоти змінного струму (сигнал після перемикавання) та опорний струм порівнюються та подаються в ланцюг керування та забезпечують захист струму.

Вихідний постійний струм повністю ізолюваний від вхідної мережі і навіть сигнал зворотного зв'язку ізолюється за допомогою муфти Opto.

Керування перемикаючим транзистором MOSFET з квадратною хвилею гарантує розсіювання потужності є дуже меншим, у порівнянні з транзистором, діапазоном. Він працює як транзистор серійного проходу в лінійних регульованих блоках живлення.

Оскільки в SMPS є високочастотний сигнал змінного струму, є

ймовірність виникнення високочастотних гармонік і, як наслідок, SMPS більш чутливий до РЧ-перешкод.

Подивимось на топології SMPS.

Блоки живлення або комутаційні режими можуть бути класифіковані на два типи, виходячи з топології схеми:

- неізолювані перетворювачі;
- ізолювані перетворювачі.

Неізолювані перетворювачі - це тип топології SMPS, де схема комутації та вихід не є ізолюваними, тобто вони мають загальний термінал.

Три основні та важливі типи неізолюваних SMPS:

- Buck Converter або понижуючий конвертер
- Boost Converter або збільшуючий конвертер
- Buck - Boost Converter

Існують інші неізолювані конструкції SMPS, такі як:

- комутовані конденсатори,
- перетворювач Cuk
- конвертер SEPIC

Але саме ці три типи дуже важливі. Вони є найпростішими з конструкцій SMPS і використовують один індуктор як елемент, що зберігає енергію, і два вимикачі, з яких один - активний перемикач (транзистор - силова MOSFET), а інший - діод.

Вихідна напруга може бути вищою (Boost або Step-up) або нижчою (Buck або Step-Down) і може контролюватися робочим циклом високочастотної квадратної хвилі (що застосовується до комутатора).

Основним недоліком неізолюваної топології є те, що ефективність комутаторів падає зі зменшенням робочого циклу.

Ізолювана топологія краще підійде для великих змін напруги.

Ізолювана топологія в SMPS використовує трансформатор як ізолятор між комутаційним елементом і виходом.

Залежно від співвідношення оборотів трансформатора, вихідна напруга

може бути вище або нижче вхідного.

Топології SMPS на основі трансформаторів можуть бути розроблені для генерування декількох вихідних напруг за допомогою використання декількох обмоток на трансформаторі.

Елементом накопичення енергії можуть бути трансформатори вторинної обмотки або окремий індуктор.

Два важливих перетворювача SMPS на основі ізольованої топології:

- Flyback Converter
- Forward Converter

Деякі з інших часто використовуваних ізольованих топологій SMPS:

- Half – bridge;
- Full – bridge;
- Push – Pull;
- Half – Forward;
- Isolated Cuk.

Buck Converter - це тип схеми SMPS і перетворювач постійного струму в постійний струм, де вихідна напруга менше вхідної напруги. Отже, Buck Converter також відомий як понижуючий конвертер.

Це одна з найпростіших методів перетворення енергії SMPS і часто використовується в оперативній пам'яті, процесорі, USB і т.д.

Простий Buck перетворювач використовує два перемикачі (один транзистор і один діод) і елемент, що зберігає енергію (індуктор), показаний на зображенні нижче (див. рис. 2.4)

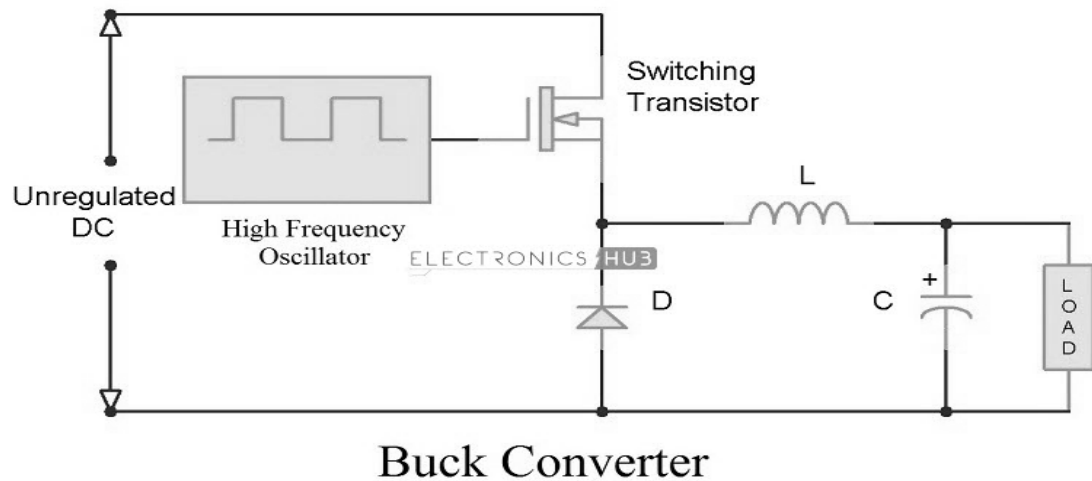


Рисунок 2.4 - Простий Buck перетворювач або перехідний перетворювач

Простий Buck перетворювач або перехідний перетворювач складається з перемикаючого транзистора, діода, індуктора та конденсатора (див. рис.2.5).

Поєднання індуктора, діода і конденсатора називається ланцюгом маховика.

Робота Buck перетворювача пояснюється щодо імпульсу квадратної хвилі. Наступне зображення показує роботу перетворювача Buck, коли вхідний імпульс ВИСОКИЙ, тобто транзистор комутації ВКЛ.

Коли імпульсний вхід на термінал шлюзу MOSFET високий, транзистор увімкнено. В результаті транзистор подасть струм навантаження.

За цей час діод D є зворотним зміщенням і не буде частиною ланцюга в цей період.

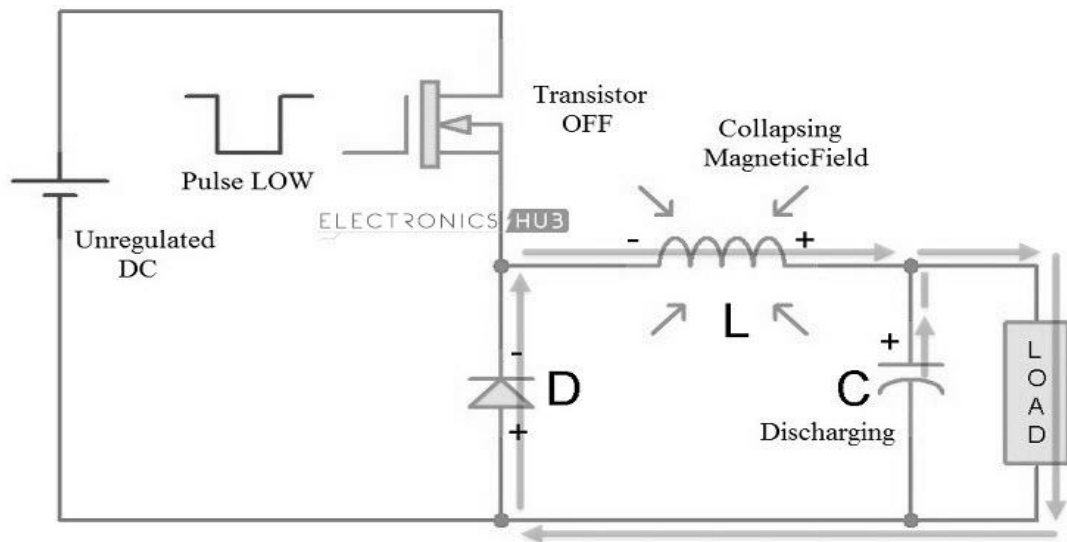


Рисунок 2.5 - Простий Buck перетворювач або перехідний перетворювач для низького імпульсу

Спочатку індуктор чинить опір зміні струму i , отже, струм до навантаження поступово збільшуватиметься з розширенням магнітного поля.

Також заряд на конденсаторі накопичується поступово аж до напруги живлення. Наступне зображення - для умови, коли імпульс стає НИЗЬКИМ, тобто транзистор вимкнено.

Коли імпульс стає НИЗЬКИМ, перемикаючий транзистор вимкнено.

Магнітне поле, сформоване під час транзисторного стану, починає руйнуватися і викидає енергію в ланцюг.

Полярність напруги на індукторі, тобто його задній e.m.f, тепер обернена.

Енергія від індуктора починає руйнуватися і утримує струм, що протікає в ланцюзі через навантаження і діод, оскільки діод D упереджений.

Як тільки енергія від індуктора повністю використана, конденсатор починає розряджатися і виступає основним блоком живлення, поки транзистор не увімкнений.

Коли транзистор увімкнений, він знову подасть струм на індуктор, конденсатор і навантаження, і процес триває.

За допомогою Buck Converters ми можемо досягти більш ніж 90% ефективності, і, як наслідок, вони часто використовуються в комп'ютерних системах, де вони перетворюють 12В живлення в зазвичай 1,8 В (для оперативної пам'яті, процесора та USB).

2.2 Неізольовані блоки живлення

Boost Converter або Step-up Converter. це тип джерела живлення з комутованим режимом, який збільшує або збільшує вихідну напругу щодо вхідної напруги.

Підвищувальні перетворювачі відомі також як перетворювачі посилення, оскільки вихідна напруга вище, ніж вхідна напруга.

Один з найвідоміших прикладів для Boost Converters - це електромобілі.

Подача від акумуляторів електричних автомобілів не буде достатньою для його роботи, оскільки для них потрібні напруги, які значно вищі (як правило, в районі 500 В), ніж живлення від акумуляторів.

Ще одне важливе застосування Boost Converters - це зарядні пристрої для ноутбуків у автомобілях.

Типові автомобільні акумулятори забезпечують 12 В, а ноутбукам потрібно десь від 18 до 22 В.

Цей простий перетворювач посилення складається з:

- комутаційного транзистора (можна використовувати ВJT або MOSFETS),
- енергозберігаючого елемента, тобто індуктора,
- іншого вимикача (діода чи іншого транзистора),
- конденсатора
- високочастотного квадратного хвилі з генератором керованого робочого циклу.

Вхід до цього перетворювача Boost є нерегульованим постійним

струмом, який можна подавати з випрямлених змінного струму, акумуляторів, сонячних генераторів постійного струму та ін.

Ми побачимо роботу цього перетворювача Boost.

Спочатку ми побачимо період, коли транзистор ввімкнено вперше (див. рис. 2.6) коли вперше імпульс високий, транзистор ввімкнено, він закриває частину ланцюга, що складається з індуктора, транзистора та вхідного живлення;

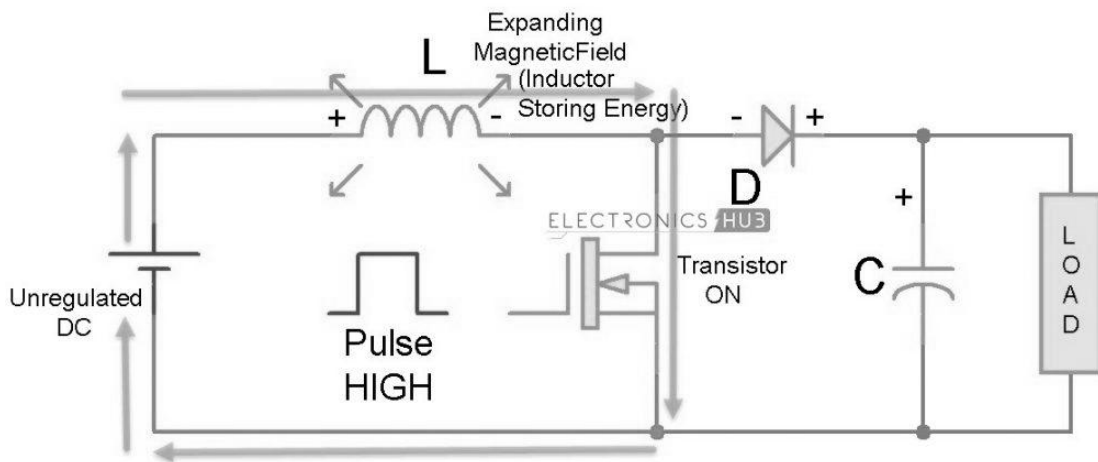


Рисунок 2.6 - Робота перетворювача Boost, коли транзистор ввімкнено вперше

- струм тече від входу через індуктор і транзистор;
- спочатку індуктор протистоїть зміні струму, але магнітне поле буде поступово збільшуватися, дозволяючи індуктору накопичувати енергію;
- імпеданс решти ланцюга, тобто діода, конденсатора і навантаження, набагато вище, а отже, в цій частині ланцюга не буде протікати струм;
- потім імпульс квадратної хвилі виходить низько, транзистор вимкнено.

Ця дія спричинить падіння струму через індуктор, створюючи зворотний Е.М.Ф в ланцюзі через руйнуюче магнітне поле

Полярність напруги на індукторі тепер обернена і буде послідовно з вхідною напругою.

Поєднання вхідної напруги та заднього випромінювача e.m.f не може пройти через індуктор, оскільки воно вимкнено.

Отже, діод упереджений і заряджає конденсатор, а також подає струм для навантаження.

Важливим моментом тут є те, що напруга, що подається на конденсатор і навантаження під час транзисторного вимкнення, є комбінацією вхідної напруги та індукторів назад Е.М.Ф, що перевищує вхідну напругу.

Коли транзистор знову ввімкнено, струм знову протікає через індуктор і транзистор (див. рис. 2.7).

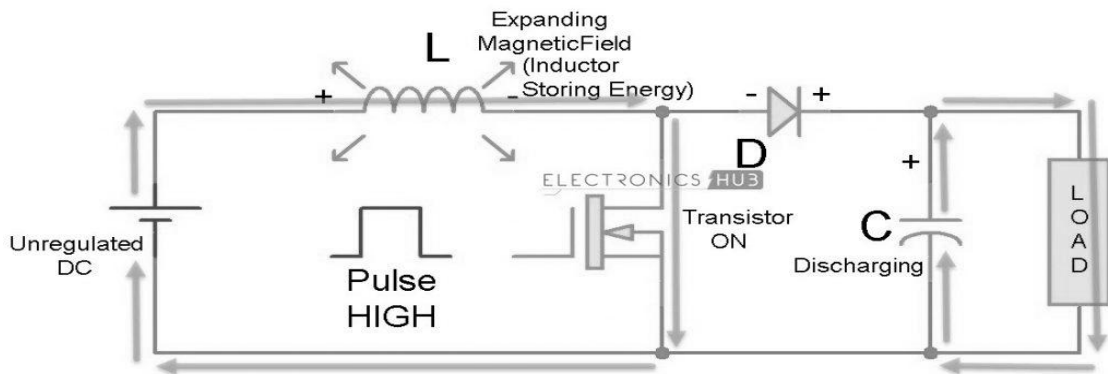


Рисунок 2.7 - Робота перетворювача Boost, коли транзистор ввімкнено

Оскільки діод є зворотним зміщенням, конденсатор розряджає його потенціал, який є сумою вхідної напруги та напруги індуктора, через навантаження, що виступає в якості його джерела в цей період.

2.3 Ізольовані блоки живлення

Flyback Converter - це тип живлення в режимі комутації, який зазвичай використовується в пристроях малої потужності.

Flyback Converter - SMPS ізоляційного типу, де вхід і вихід ізольовані

трансформатором.

Схему простого перетворювача Flyback наведено на рис. 2.8.

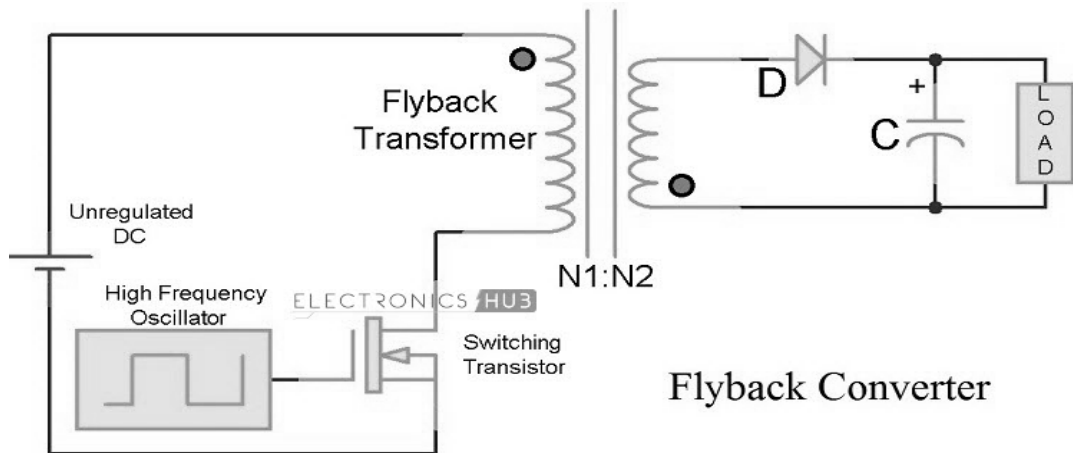


Рисунок 2.8 Основні компоненти перетворювача Flyback

Основні компоненти перетворювача Flyback

- комутаційний транзистор;
- схема осцилятора;
- трансформатор;
- комутатор (як діод);
- конденсатор.

Трансформатор відрізняється від звичайного трансформатора і називається трансформатором Flyback.

Коли транзистор увімкнено, струм протікає через первинну частину трансформатора, при цьому кінцева має більший потенціал.

В результаті полярність напруги, що індукується у вторинній, буде зворотною до тієї, що є первинною.

Отже, діод D стає зворотним зміщенням. Якщо конденсатор зарядився в попередньому циклі, він розрядиться через навантаження.

Функціонування перетворювача Flyback: коли імпульс стає низьким, транзистор вимикається, а первинна частина трансформатора не передає

електричній струм.

Енергія в вторинному трансформаторі буде вивільнена в ланцюг, а також полярність у вторинній буде повернена, тобто вона стане позитивною.

Отже, діод зміщений вперед забезпечує енергію, що зберігається у вторинній котушці, яка виступає в якості джерела.

Він заряджає конденсатор, а також подає струм для навантаження.

Іншим важливим блоком живлення в режимі комутації є Forward Converter

Це ще один ізолюваний тип SMPS і виробляє контрольований і регульований постійний струм з нерегульованого живлення постійного струму.

Ефективність Forward Converter трохи більше, ніж у Flyback Converter, і його часто використовують у застосуванні, коли потреби в потужності трохи вище - зазвичай близько 200 Вт.

Конструкція Forward перетворювачів складніша, ніж Flyback Converters (див. рис.2.9).

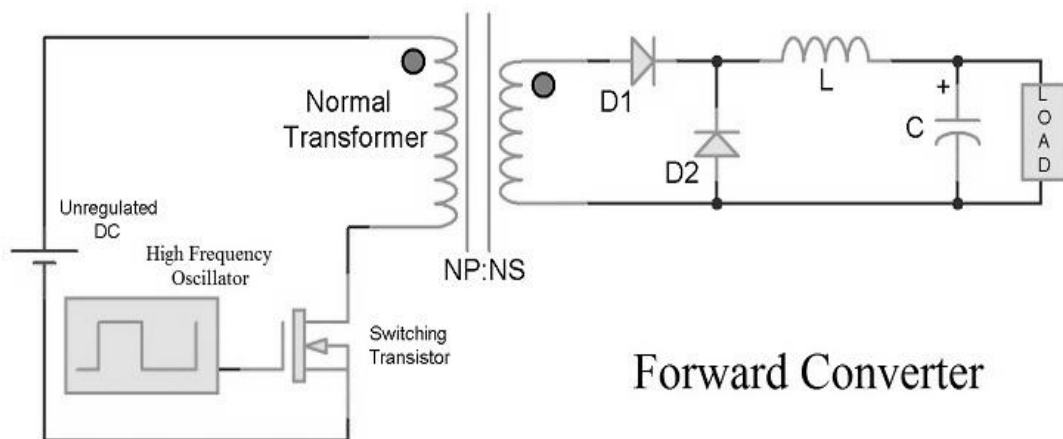


Рисунок 2.9 - Проста схема перетворювача Forward Converter

Проста схема перетворювача Forward Converter:

- швидкодіючий транзистор;

- схема управління для управління робочим циклом квадратної хвилі;
- нормальний трансформатор;
- два діоди для випрямлення змінного струму;
- індуктор;
- конденсатор для фільтрації.

Робота перетворювача Forward, коли транзистор увімкнено (див рис.2.10).

Коли імпульс ВИСОКИЙ, транзистор увімкнено і, як результат, первинна котушка трансформатора починає проводити.

В результаті в вторинній котушці трансформатора здійснюється індукція напруги.

Полярність напруги, що індукується у вторинній, аналогічна до первинної, а отже, діод D_1 стає упередженим.

Напруга від вторинного почне надходити через діод D_1 , індуктор, конденсатор і нарешті навантаження.

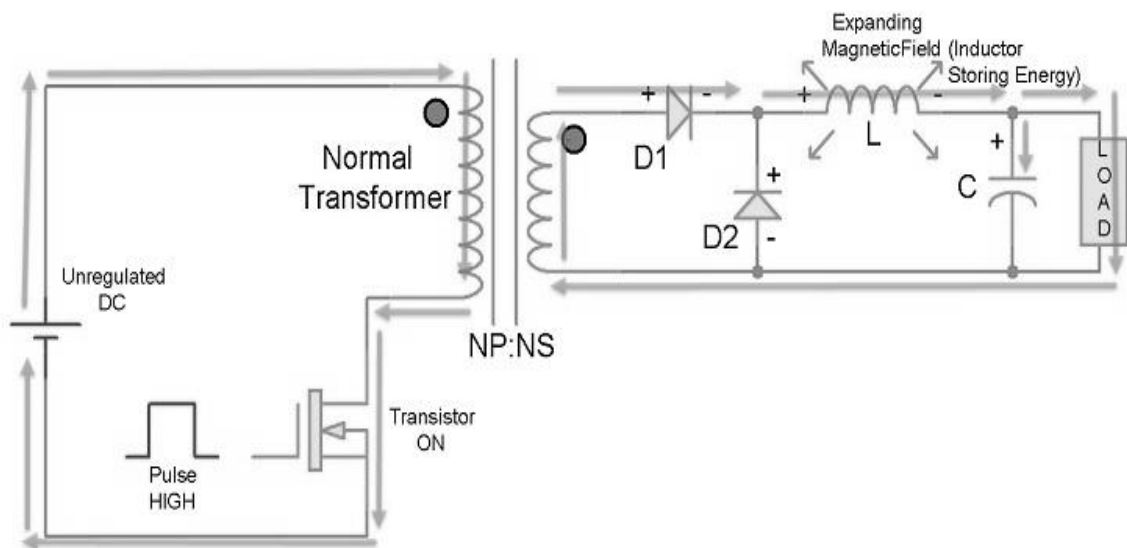


Рисунок 2.10 - Схема роботи Forward Converter коли транзистор увімкнено

У цей період і індуктор, і конденсатор зберігають енергію у вигляді магнітного поля та електричного поля відповідно.

Коли імпульс стає НИЗ, транзистор вимикається і, як результат, первинна котушка перестає проводити.

Це, в свою чергу, припинить індукувати струм у вторинної котушці.

Ця раптова зміна струму (або падіння) струму призведе до зворотного e.m.f індуктора, а полярність його напруги обернена.

Енергія в індукторі починає руйнуватися в ланцюзі через навантаження і діод D_2 (оскільки він зміщений вперед).

Як тільки енергія в індукторі закінчується, конденсатор починає розряджатися через навантаження і виступає тимчасовим джерелом навантаження.

Це триває, поки транзистор знову не увімкнеться. Вихідна напруга перетворювача Forward залежить від співвідношення витків трансформатора, а також від робочого циклу модулятора ширини імпульсна.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІМПУЛЬСНИХ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ У СИСТЕМІ LTSPICE

Пакет LTspice дозволяє легко створювати власні елементи із необхідною функціональністю. Розглянемо технологію створення власного елемента на прикладі створення генератора прямокутних імпульсів з лінійно змінним заповненням. Такий генератор був би дуже корисним при аналізі особливостей роботи схем широтно-імпульсної модуляції. Робота зі створення нового елемента складається із трьох основних етапів:

1. Побудова внутрішньої схеми та функціональних залежностей елемента. Створення файлу *.asc.
2. Побудова графічного символу для елемента та позначення його висновків. Створення файлу *.asy.
3. Корекція вихідної схеми елемента та узгодження назв виводів схеми та графічний символ.

Після цього створений елемент можна включати поряд з іншими елементами у будь-яку схему.

Підключення створеного елемента в схему відбувається шляхом копіювання папки проекту елемента за адресою:

```
C:\Users\User\AppData\Local\LTspice\lib\sym\
```

Після чого елемент стає доступним для користувача і може бути використаний в моделюванні.

Використовуючи створений бібліотечний елемент PWM модуля проведено моделювання схеми імпульсного джерела живлення.

Для початку з ціллю порівняння промодельована схема імпульсного StepDown перетворювача (див. рис.3.1).

3.1 Моделювання і дослідження спрощеної схеми широтно-імпульсного модулятора

Основні прийоми моделювання наведені в літературі [5,7,8].

В схему в якості елемента перемикання включений транзисторний ключ Q1. Керуючий генератор – цепочка CLK та резистор R1. В іншому, це стандартний перетворювач, що понижує (StepDown).

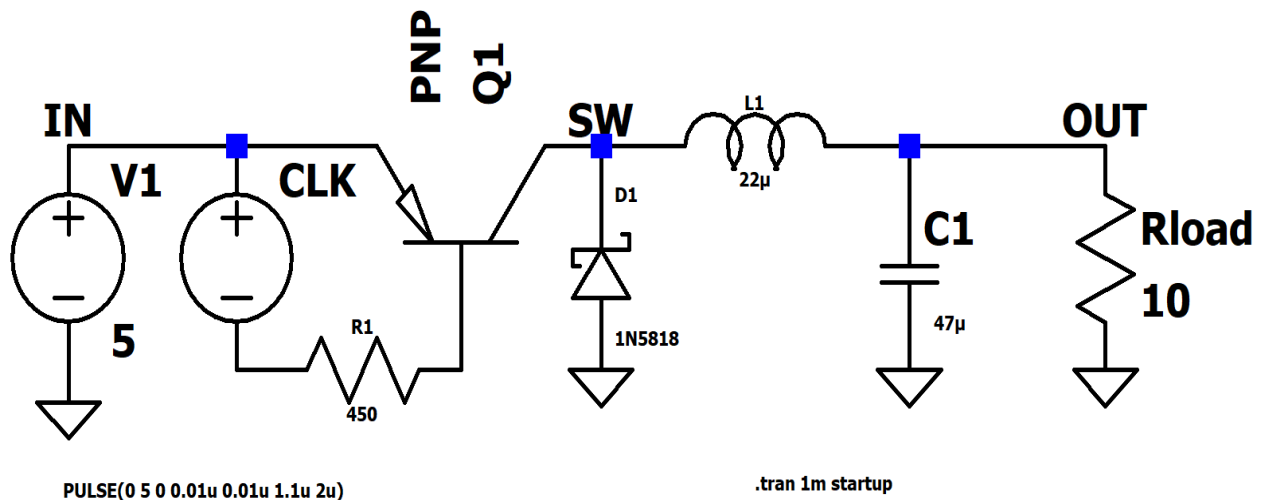


Рисунок 3.1 Схема StepDown імпульсного перетворювача

Результат моделювання схеми приведений на рис.3.2 де показана залежність вихідної напруги $V(out)$ та струму індуктивності $I(L1)$.

На прикладі цієї схеми проведений параметричний аналіз залежності вихідної напруги $V(out)$ від коефіцієнта заповнення імпульсів опорного генератора Q.

Для цього у імпульсного генератора ввімкнена параметрична залежність тривалості прямого ходу директивою:

`.Step Param Q 0 1 0.2`

Ця залежність наведена на рис.3.3, видно що величина вихідної напруги в стаціонарному режимі пропорційна заповненню сигналу генератора. Ця властивість використовується в ШІМ.

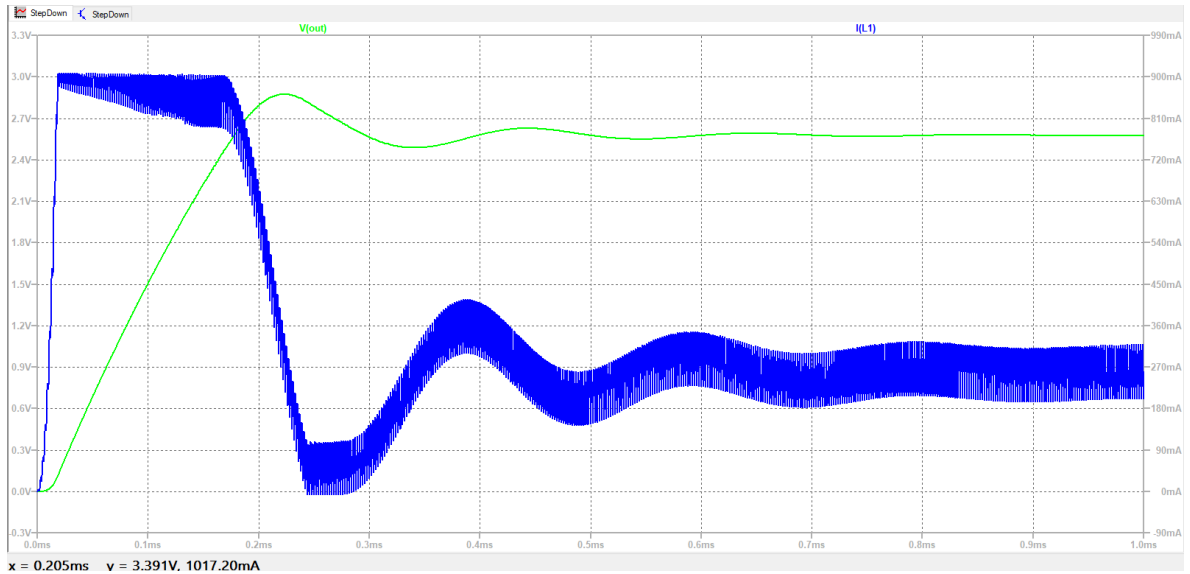


Рисунок 3.2 Залежність вихідної напруги $V(out)$ та струму індуктивності $I(L1)$ в схемі StepDown імпульсного перетворювача

Також час встановлення вихідного сигналу τ_v пропорційна значенню вихідної напруги $V(out)$ й визначається максимальним струмом ключа і ємністю конденсатора фільтра C .

$$\tau_v = \frac{V_{out} \cdot C}{I_{max}}, \quad (3.1)$$

де V_{out} – вхідна напруга, В;

C – ємність конденсатора фільтра, мкФ;

I_{max} – струм, А .

При даних $C1=47$ мкФ, $I_{max}=0,9$ А, $V(out)=5$ В.

$$\tau_v = \frac{5 \cdot 47 \times 10^{-6}}{0,9} \approx 0,26 \text{ ms}.$$

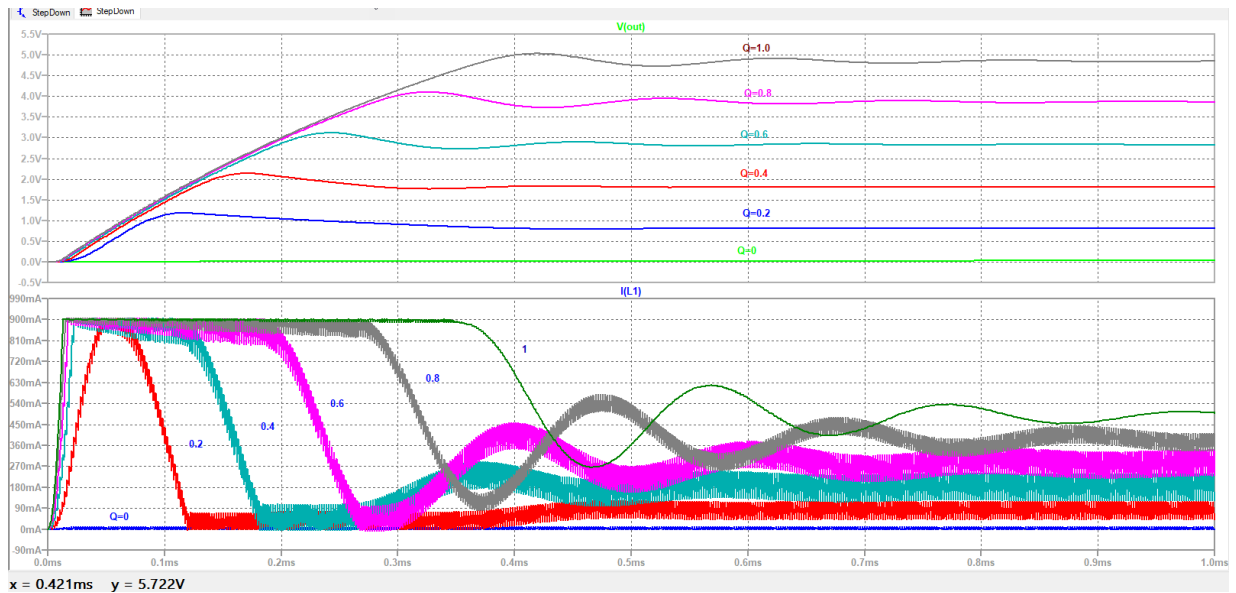


Рисунок 3.3 Залежність вихідної напруги $V(out)$ та струму індуктивності $I(L1)$ від коефіцієнта заповнення Q

До схеми рис. 3.1 замість блока CLK підключимо створений нами генератор прямокутних імпульсів с заповненням що лінійно змінюється (див. рис.3.4).

Генератор PWM разом з діодом D1 буде емулювати вихід цифрової схеми з ШІМ.

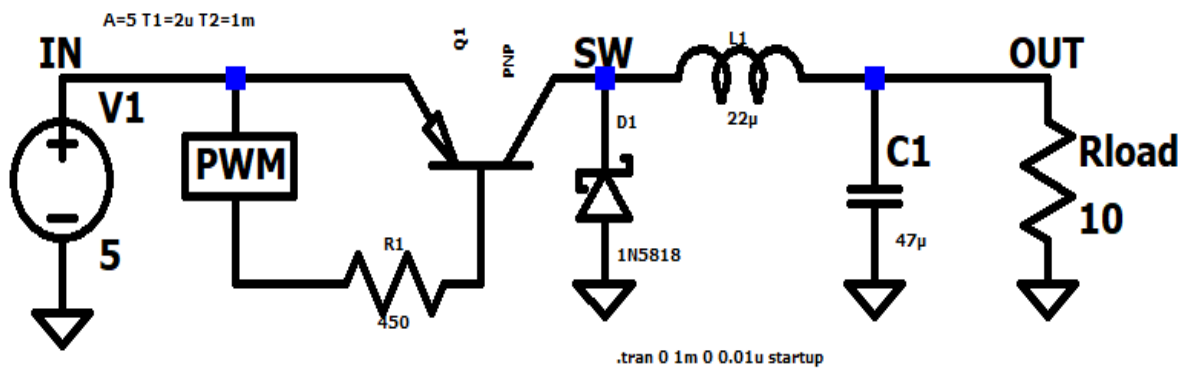


Рисунок 3.4 Схема ШІМ модулятора побудованого на базі схеми StepDown

Заповнення Q ($Q = t_{\text{трив}}/T$) сигнала нашого ШІМ генератора змінюється по пилоподібному закону. Імпульсний сигнал має мінімальне заповнення $Q=0$ в точках які кратні 1ms , тобто в точках 0 і 1ms . Максимальне заповнення $Q=1$ відбувається через $0,5\text{ms}$.

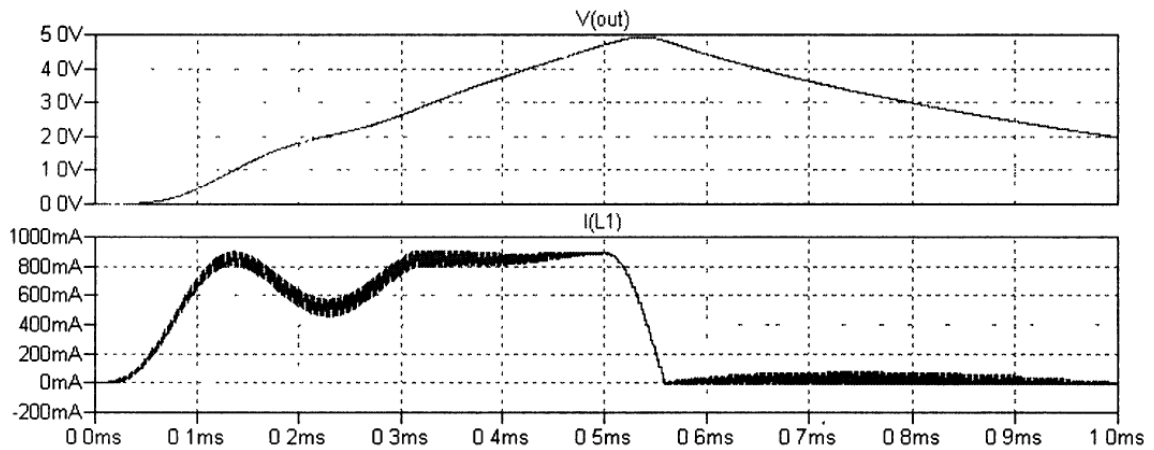


Рисунок 3.5 Залежність змін вихідної напруги $V(\text{out})$ і струму індуктивності $I(\text{L1})$ від часу для ШІМ-сигналу із змінним заповненням

На рис. 3.6 показані фрагменти змін напруги імпульсного ШІМ-сигналу на виході ключа $V(\text{SW})$, вихідної напруги $V(\text{out})$ для інтервалів часу з різним значенням заповнення Q .

Як видно з цих залежностей, вихідна напруга $V(\text{out})$ приблизно пропорційно заповненню Q імпульсного ШІМ-сигналу. Однак ця залежність дещо спотворена відставанням змін вихідної напруги від змін заповнення.

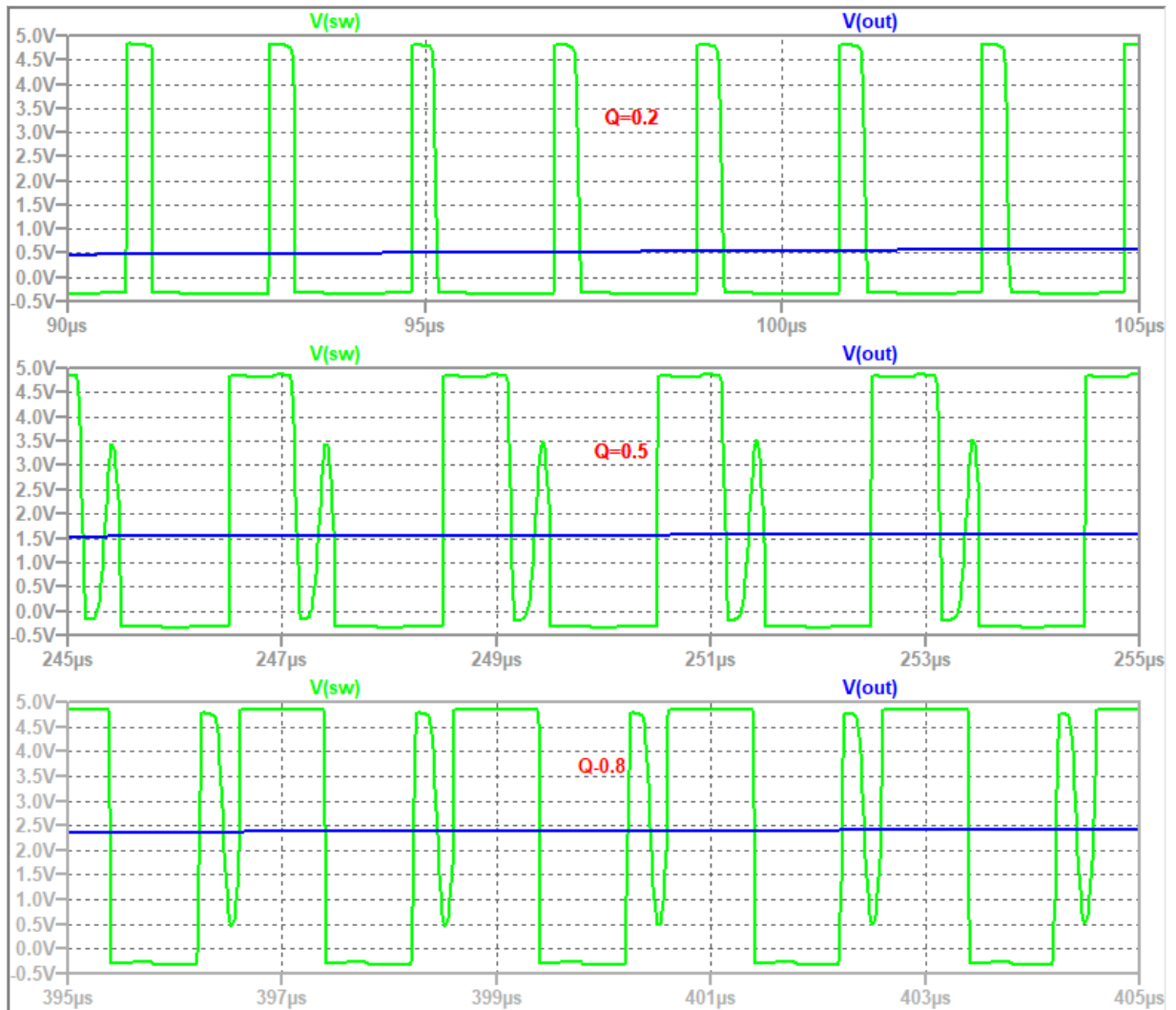


Рисунок 3.6. Залежність вихідної напруги $V(out)$ від коефіцієнта заповнення Q (напруга ключа постійна $V(sw)=5$, причина спотворення П-імпульсів поки невідома)

3.2 Моделювання схеми синхронного ШІМ перетворювача

Перетворювачі з діодом у ланцюги зворотного ходу мають суттєвий недолік: низька ефективність при малих вихідних напругах, обумовлена помітним падінням напруги на відкритому діоді. Для усунення цього недоліку замість діода включають польовий транзистор. На відміну від діода, відкритий польовий транзистор веде себе як опір, і падіння напруги на ньому при малих струмах прагне нуля [6,7].

Транзистор, що вмикається замість діода, повинен перемикатися синхронно в протифазі з основним ключовим транзистором, тому такі схеми називають синхронними. Схема синхронного понижуючого перетворювача, що використовується для демодуляції ШІМ-сигналу, показано на рис. 3.7.

У цій схемі вихідний ключ побудований на компліментарній парі польових транзисторів M1 та M2 взаємно додаткової полярності. Керуючі затвори цих транзисторів підключені до загального джерела сигналу, що управляє. Вихід схеми працює таким чином, що коли ключ M1 відкрито, ключ M2 закрито. І навпаки: коли ключ M1 закрито, ключ M2 відкритий. Саме такій побудові вихідного каскаду відповідає схема стандартного КМОП-виходу сучасної цифрові мікросхеми.

Параметри генератора імпульсних сигналів:
T1 = 2μ - період частоти повторення імпульсів 2 мікросекунди;
T2 = 1m - Період змінення заповнення 1 мілісекунда;
A = 5 - Амплітуда сигналу 5 В.

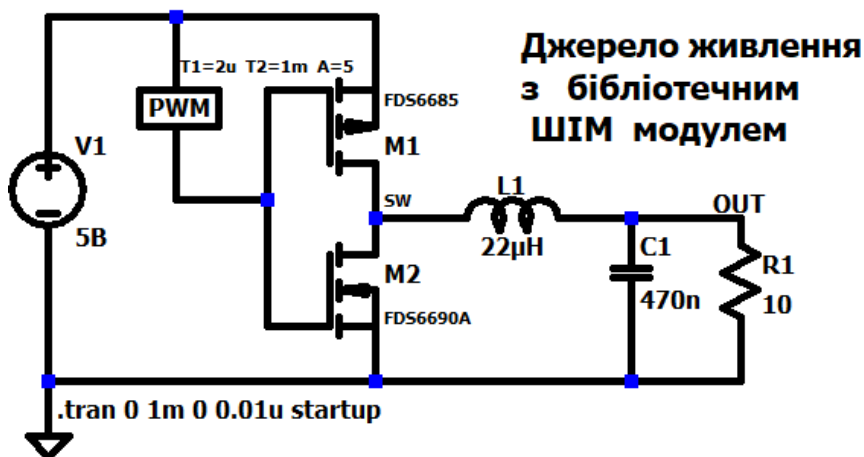


Рисунок 3.7 Схема синхронного ШІМ перетворювача

Теоретичний аналіз протікання струмів в індуктивності у схемі синхронного перетворювача нічим не відрізняється від аналізу для перетворювачів з діодом. Звичайно, існує поправка на те, що на зворотному

ході під час перетворення струм тече не через діод, а через синхронний ключ.

Відкритому стану ключа M1 відповідає прямий, а відкритому стану M2 - зворотний хідг перетворювача.

На рис. 3.8 показано результати моделювання змін вихідного сигналу під впливом керуючого прямокутного імпульсного сигналу із змінним пилкоподібним законом заповнення.

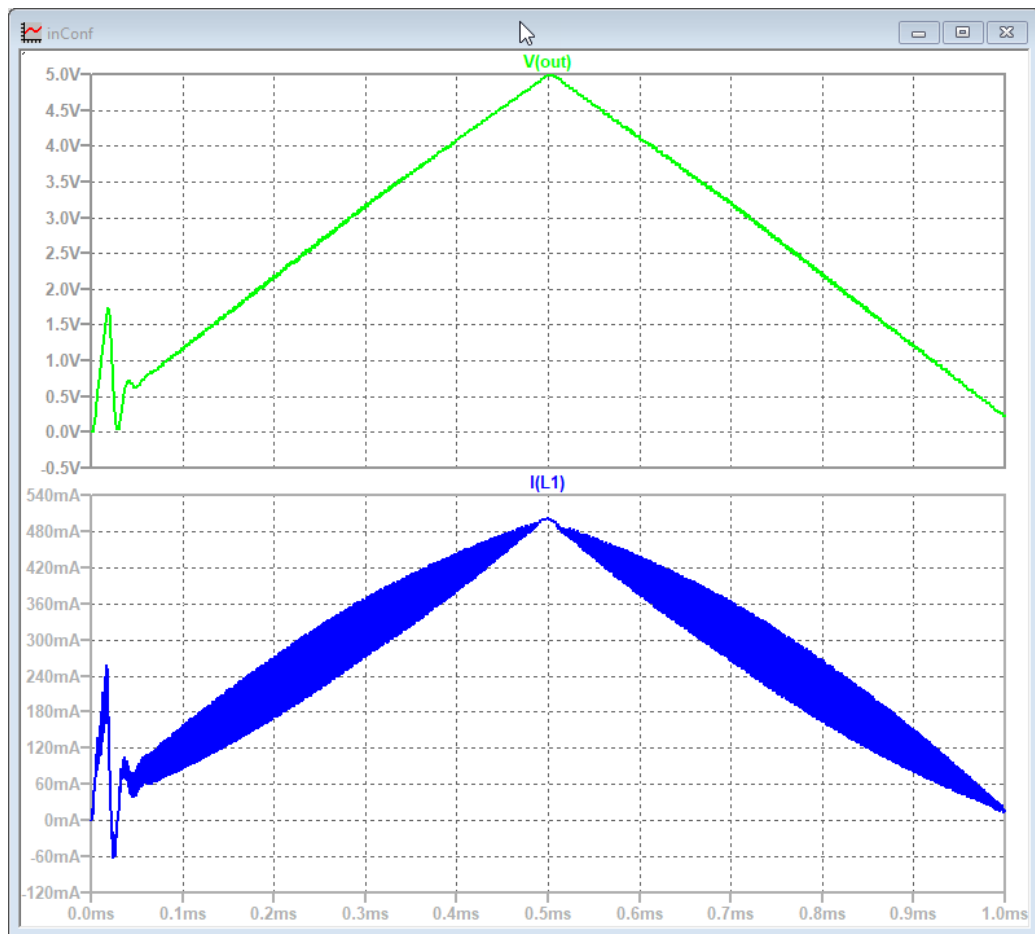


Рисунок 3.8 Залежність змін вихідної напруги $V(out)$, опорної функції заповнення $Q = \text{if}(\text{time} < 0.5, \text{time}, 1m - \text{time})$ і струму індуктивності $I(L1)$ від часу

Зверніть увагу, що на цьому графіку лінія вихідної напруги $V(out)$ збігається з лінією опорної функції, що відображає закон зміни заповнення.

Таким чином, побудова демодулятора ШІМ-сигналу за схемою синхронного понижуючого перетворювача істотно покращує лінійність

перетворювача і одночасно збільшує ККД схеми за рахунок зменшення втрат на комутуючих елементах.

Іноді паралельно виходу синхронного ключа зворотного ходу підключають діод. Це роблять для виключення небажаних викидів напруги, коли не вдається досягти повної синхронності перемикування ключів прямого та зворотного ходу. Якщо ключ прямого ходу вже закрився, а ключ зворотний хід ще не відкрився, струм тече через діод.

На рис. 3.9 (з використанням даних графіка на рис.3.8) побудована залежність вихідної напруги $V(out)$ від коефіцієнта заповнення Q .

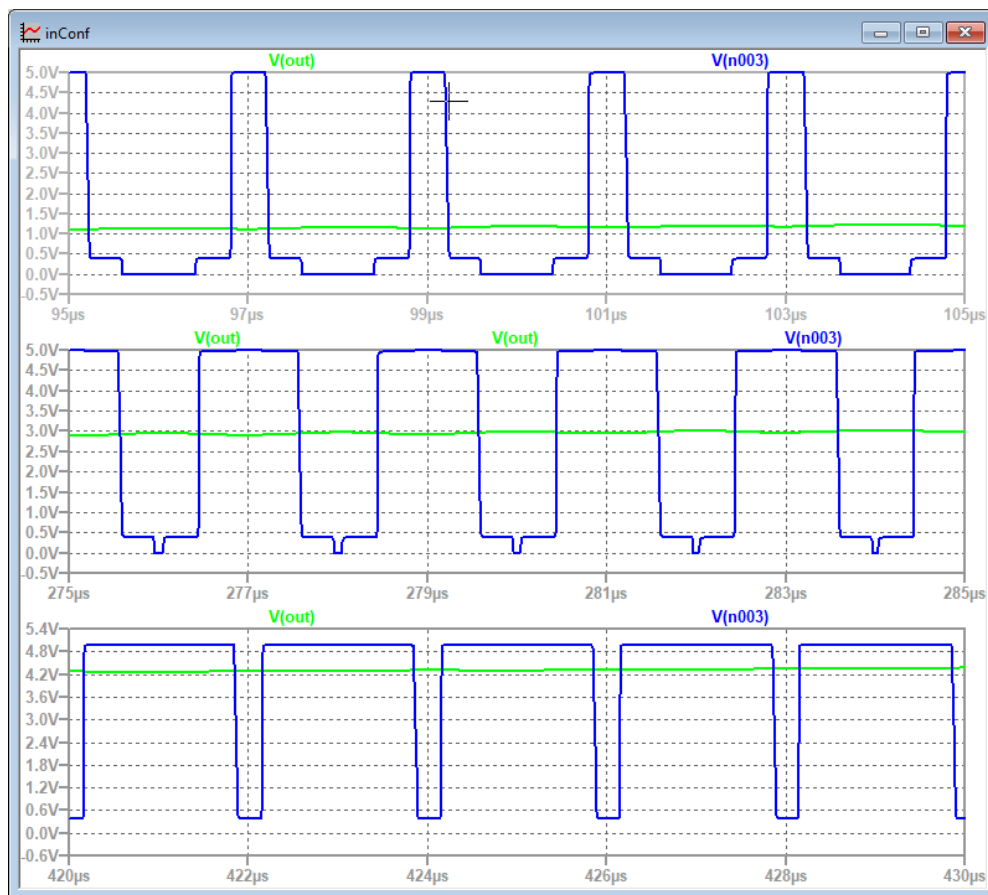


Рисунок 3.9 Залежність вих. напруги $V(out)$ від коефіцієнта заповнення Q

$V(n003)$ напруга в точці з міткою SW (див рис.3.7). Форма цієї залежності відображає ступінь заповнення. Як видно з графіка, чим більше коефіцієнт заповнення тим більше вихідна напруга.

ВИСНОВОК

В першому розділі проведено розгляд програми схемотехнічного моделювання LTSpice. Розглянені можливості та функціонал програми. Основні прийоми роботи в пакеті. Обґрунтовано застосування пакета для виконання даної роботи.

Моделювання в LTSpice є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації ШІМ перетворювачів. Завдяки цій роботі можна було точно налаштувати параметри пристрою і побачити його поведінку. Оптимізація компонентів та параметрів перетворювача призвела до значного поліпшення його ефективності та зменшення втрат потужності. Отримані знання та досвід ляжуть в основу майбутніх професійних досягнень у галузі електронного проектування. Продовжується подальша робота над поліпшенням схеми та моделюванням її роботи, що підтверджує необхідність глибокого вивчення та практичного застосування теоретичних знань у реальних умовах. Оптимізація компонентів та параметрів перетворювача дозволила значно покращити його ефективність та зменшити втрати потужності. Ретельний вибір компонентів та налаштування схеми є критично важливими аспектами для досягнення оптимальної продуктивності та надійності пристроїв.

В другому розділі проведено огляд джерел вторинного живлення. Їх класифікацію, основні структури.

В третьому розділі проведено моделювання імпульсних джерел живлення з ШІМ модуляцією.

Побудовані відповідні схеми. І проведені дослідження згідно завданню.

- Створений бібліотечний елемент PWM який був випробуваний на проекті простого джерела StepDown.
- Випробуваний елемент був інтегрований в бібліотеку LTSpice і був використаний для моделювання інших схем.

- Проведені дослідження по вивченню залежності вихідної напруги $V(\text{out})$ від коефіцієнта заповнення Q .

Схеми працюють. Завдання кваліфікаційної роботи виконано.

За темою роботи представлена доповідь на 21-й всеукраїнській конференції студентів і молодих науковців. Одеса, 26 квітня 2024 р. Матеріали викладені в збірнику тез конференції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Farzin Asadi Essential Circuit Analysis using LTspice /Springer 2023. – 554 p.
2. Pooja Mohindru, Pankaj Mohindru Electronic Circuit Analysis using LTSpice XVII Simulator: A Practical Guide for Beginners /CRC Press 2021. – 237 p.
3. Іваннік Г.В., Бондаренко В.М. Основи теорії кіл: Моделювання в LTSpice / КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ 2023. – 59 с.
4. Cuk S., Middlebrook R. D. A new optimum topology switching dc-to-dc converter /Power Electronics Specialists Conference, Palo Alto, Calif., June 14-16, 1977, Record. (A79-10876 01-33) New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1977, p. 160-179.
5. Raymond A. Mack Demystifying Switching Power Supplies 1st ed. /Newnes 2005. – 344 p.
6. Byungcho Choi Pulsewidth Modulated Dc-to-Dc Power Conversion Circuits, Dynamics, Control, and Dc Power Distribution Systems / Wiley 2022. – 723 p.
7. Marian K. Kazimierczuk Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters / Wiley 2008. – 811 p.
8. Gerry Moschopoulos DC–DC Converter topologies: Basic to Advanced /Wiley 2024. – 461 p.
9. Henry Zhang. Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies. <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-140.html>.
10. Damond Goodwin. Power Supplies: Understanding the Differences Between Linear and Switching. <https://control.com/technical-articles/power-supplies-understanding-the-differences-between-linear-and-switching/>.
11. Synchronous or Nonsynchronous Topology? Boost System Performance with the Right DC-DC Converter. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/synchronous-or-nonsynchronous-topology-boost-system-performance-with-the-right-dcdc-converter.html>.