

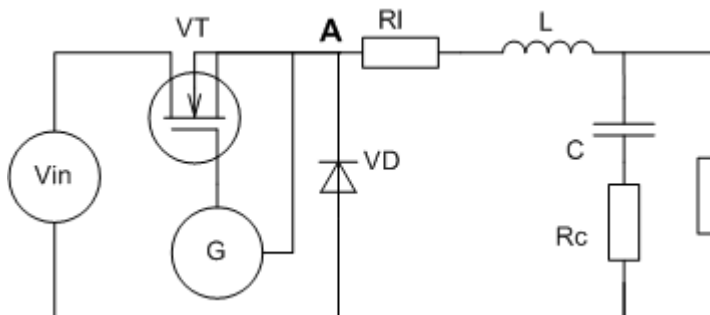
Лабораторна робота 2. Моделювання dc/dc перетворювачів та дослідження їх характеристик.

Імпульсні перетворювачі напруги (dc/dc converters) широко застосовуються для побудови розгалужених та керованих джерел живлення. Порівняно з лінійними регуляторами вони мають значно вищий ККД.

Регулятор I типу. Понижуючий перетворювач. Buck (step-down) converter.

Використовується для регулювання вихідної напруги у межах від нуля до напруги живлення з високим ККД.

Структурна схема знижуючого перетворювача

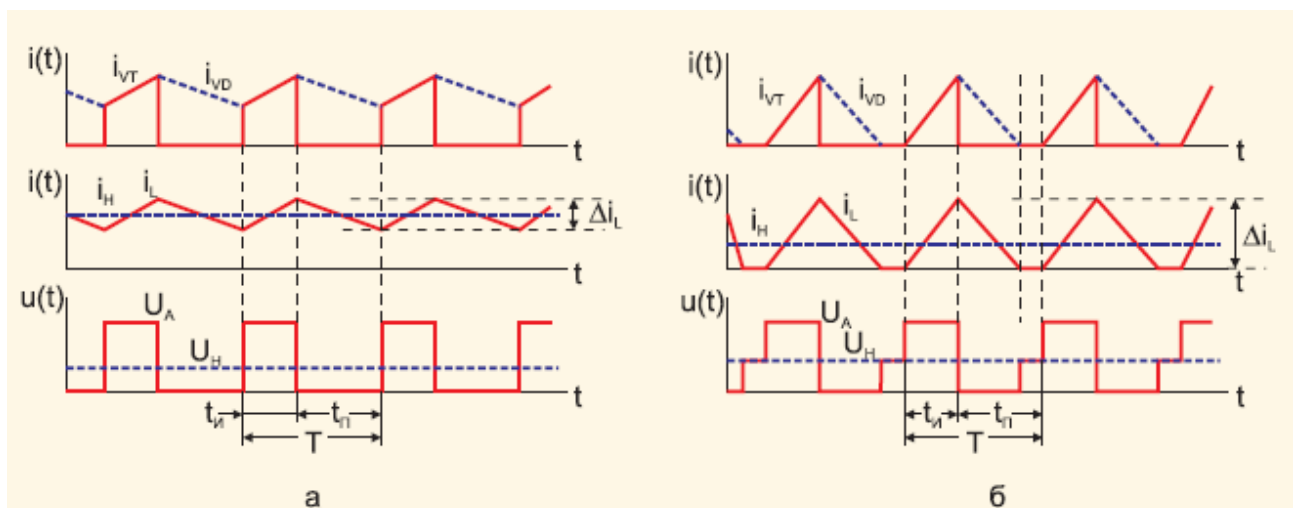


Тут G – генератор імпульсів ШИМ сигналу, R_l , R_c – відповідно паразитні опори реактивних компонентів.

Коли ключ відкритий, струм протікає через джерело живлення, дросель та навантаження і нарастає до максимального значення.

При закритому ключі, дросель виступає у ролі джерела струму для кола діод-навантаження.

Виділяють два основні режими перетворювача – режим неперервних (а) та переривчастих (б) струмів.



Амплітуда коливань струму дроселя

$$\Delta I_L = \frac{1}{fL} U_n \left(1 - \frac{U_n}{U_{in}} \right)$$

Характеристика регулювання ідеального перетворювача

$$U_n = U_{in} \gamma$$

З урахуванням паразитних елементів

$$U_n = U_{in} \gamma - I_n (r_{VT} + r_L) - U_{VD} (1 - \gamma)$$

Для забезпечення режиму неперервного струму та допустимого рівня пульсацій струму, індуктивність дроселя повинна задовольняти умові

$$L \geq \frac{U_n \left(1 - \frac{U_n}{U_{in, \max}} \right) T}{\Delta I_L} \approx \frac{(U_{in} - U_n) U_n}{U_{in} K_{pL} I_{n, \max} f}$$

Для забезпечення максимально допустимого рівня пульсацій, ємність фільтра має задовольняти умові

$$C \geq \frac{\Delta I_L}{8f \Delta U_n}, \text{ де коефіцієнт пульсацій напруги конденсатора } K_{pC} = \frac{\Delta U_n}{U_n}$$

Для круглого дроселя на нещільно заповненому магнітному осередку, з відношенням довжини до діаметру порядку 20, індуктивність можна розрахувати за наближеною формулою

$$L = 0.75 \mu_0 l w^2$$

Завдання 1. Проектування знижуючого перетворювача

1. Обрати характеристики перетворювача згідно варіанта
2. Розрахувати реактивні елементи схеми. Для дроселя розрахувати його геометрію та оцінити опір котушки.
3. Промодельовати отриману схему. Отримати епюри перехідного та усталеного режимів роботи перетворювача.
4. Змінюючи коефіцієнт заповнення імпульса, побудувати характеристику регулювання перетворювача та характеристику ККД.
5. Дослідити вплив частоти перетворення на характеристику регулювання.
6. Дослідити вплив опору навантаження на характеристику регулювання.

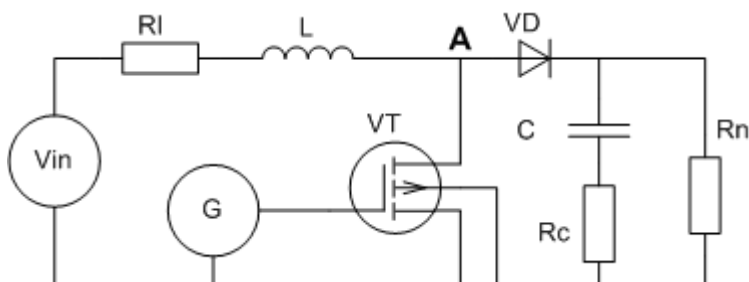
Варіанти 1

| | Напруга живлення, В | Вихідна напруга, В | Максимальний вихідний струм, А | Частота перетворення, кГц | Коефіцієнт пульсацій напруги | Коефіцієнт пульсацій струму |
|----|---------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 12 | 1,8 | 15 | 100 | 0,028 | 0,17 |
| 2 | 15 | 1,7 | 16 | 80 | 0,029 | 0,28 |
| 3 | 5 | 1,3 | 14 | 120 | 0,014 | 0,11 |
| 4 | 12 | 1,4 | 16 | 80 | 0,039 | 0,41 |
| 5 | 5 | 1,3 | 12 | 130 | 0,038 | 0,25 |
| 6 | 12 | 1,9 | 13 | 100 | 0,014 | 0,4 |
| 7 | 9 | 1,5 | 12 | 90 | 0,015 | 0,29 |
| 8 | 12 | 1,4 | 14 | 70 | 0,038 | 0,38 |
| 9 | 9 | 1,9 | 20 | 110 | 0,025 | 0,11 |
| 10 | 5 | 1,1 | 14 | 80 | 0,02 | 0,45 |
| 11 | 9 | 1,8 | 19 | 90 | 0,011 | 0,11 |
| 12 | 5 | 1,1 | 18 | 180 | 0,038 | 0,15 |
| 13 | 12 | 1,2 | 16 | 120 | 0,037 | 0,38 |
| 14 | 9 | 1,4 | 12 | 170 | 0,016 | 0,2 |
| 15 | 15 | 1,8 | 18 | 130 | 0,02 | 0,45 |
| 16 | 9 | 1,6 | 23 | 190 | 0,031 | 0,16 |
| 17 | 5 | 1,9 | 20 | 90 | 0,043 | 0,33 |
| 18 | 15 | 1,2 | 18 | 110 | 0,025 | 0,28 |
| 19 | 15 | 1,5 | 25 | 180 | 0,016 | 0,17 |
| 20 | 15 | 1,3 | 23 | 80 | 0,012 | 0,27 |

Регулятор II типу. Підвищуючий перетворювач. Boost (step-up) converter.

Використовується тоді, коли необхідно отримати вихідну напругу більшу за напругу живлення.

Структурна схема бустерного перетворювача



Тут G – генератор керуючих імпульсів, R_l , R_c – відповідно паразитні опори реактивних компонентів.

Ключ на транзисторі відкривається та закривається з частотою перевернення, що задана генератором. Робочий цикл перетворювача складається з двох фаз – заряду та розряду дроселя.

У фазі заряду ключ замкнений і струм заряду протікає через дросель та джерело живлення.

Напруга на дроселі

$$U_L = L \frac{di_3}{dt}, \text{ оскільки дросель замкнений на джерело живлення,}$$

$$di_3 = \frac{1}{L} \int U_L dt \text{ відповідно } i_3(t) = \frac{U_{in} t}{L} \text{ швидкість заряду дроселя обернено пропорційна}$$

його індуктивності.

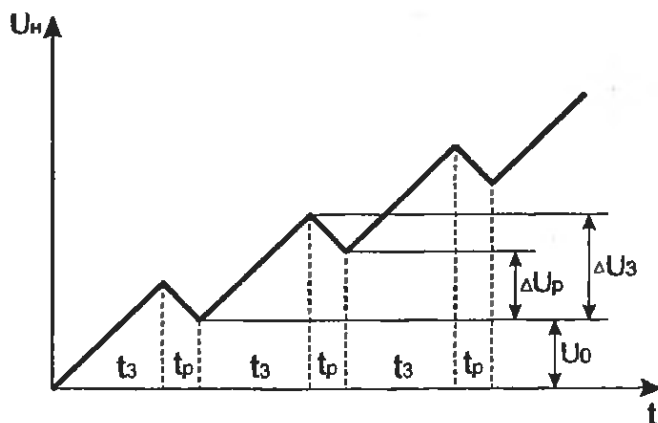
У фазі розряду ключ розімкнений і розрядний струм замикається через діод, навантаження, та підзаряджає конденсатор.

Напруга на конденсаторі

$$U_C = \frac{1}{C} \int i dt = U_o + \frac{i_p t_3}{C} = U_n, \text{ тут } U_o \text{ – напруга на конденсаторі в момент перемикання.}$$

Тобто до початкового значення напруги на конденсаторі додається дельта, що компенсує втрату енергії дроселя за рахунок розряду на навантаження.

У перехідному режимі напруга на навантаженні зростає

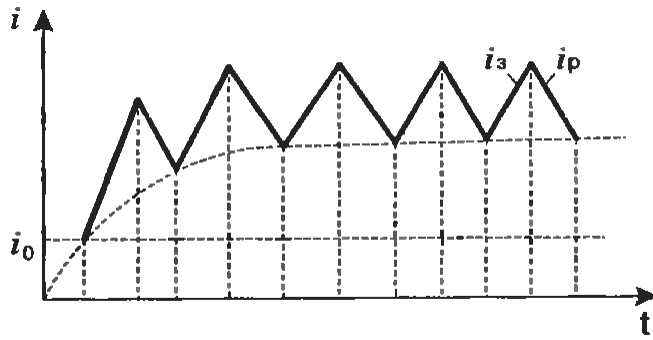


Струм дроселя у фазі заряду має максимальне значення

$$i_3 = i_0 + \frac{U_{in} t_3}{L} \text{ де } i_0 = \frac{V_{in}}{R_n} \text{ - струм дроселя при постійно відкритому ключі.}$$

У фазі розряду до дроселя прикладена напруга $(U_n - U_{in})$ і його струм спадає.

В усталеному режимі додавання струму у фазі заряду урівноважене його втратою при розряді.

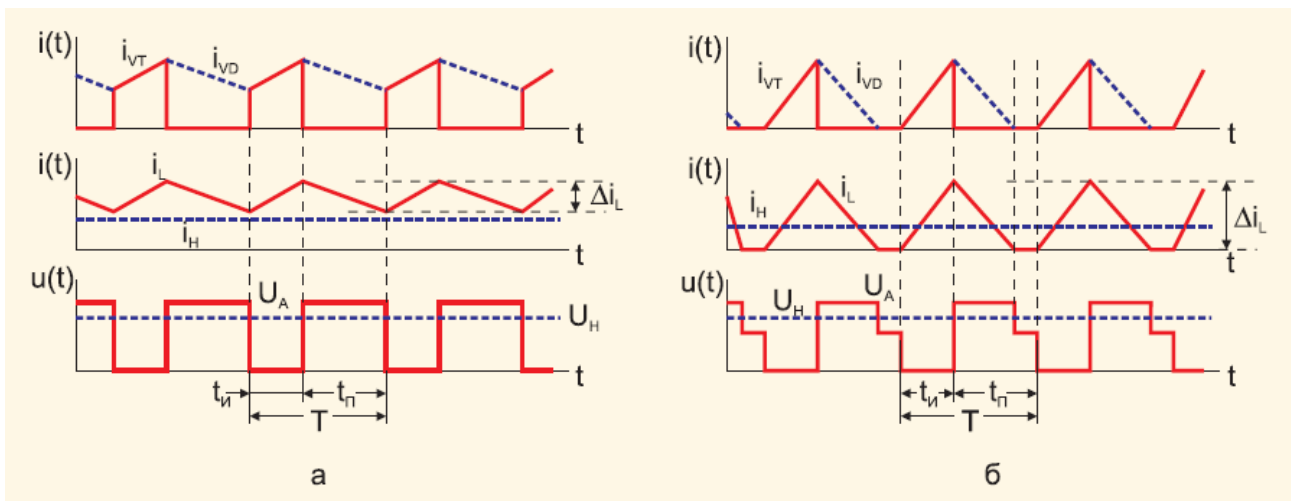


$$\frac{U_{in}t_3}{L} + i_0 = \frac{(U_{in} - U_n)t_p}{L} + i_0$$

$$U_n = U_{in} \frac{t_3 + t_p}{t_p} = \frac{U_{in}}{1 - \gamma}$$

Таким чином визначається регулювочна характеристика перетворювача – залежність коефіцієнту передачі від коефіцієнта заповнення керуючих імпульсів.

Виділяють два режими роботи бустерного перетворювача – неперервного (а) та перервного (б) струму.



З урахуванням паразитних елементів, характеристика регулювання матиме такий вигляд:

$$U_n = \frac{U_{in}}{1 - \gamma} - I_n \frac{r_{VT} + r_L}{(1 - \gamma)^2} - U_{VD}$$

При проектуванні бустерного перетворювача слід починати з оцінки потужності у навантаженні

$$P_n = U_n I_n = \frac{I_L U_n}{2}$$

Струм навантаження обмежений згори струмом заряду дроселя, який залежить від часу заряду та індуктивності, таким чином максимальне значення індуктивності дроселя

$$L_{\max} = \frac{U_{in} U_n t_{3,\max}}{2P_n}$$

Перевищення значення індуктивності приводить до зниження ККД перетворювача.

Знизу індуктивність обмежена максимальним струмом навантаження та ключа.

$$i_{L,\max} = i_0 + \frac{U_{n,\min} t_{3,\max}}{L_{\min}}$$

$$L_{\min} = \frac{U_{n,\min} t_{3,\max}}{i_{L,\max}}, \quad i_{L,\max} = 2i_n$$

Діючий струм транзистора $I_{VT} = i_L \sqrt{\gamma/2}$ не повинен перевищувати допустиме значення.

Найбільше значення індуктивності повинно значно перевищувати найменше. Робоче значення слід обирати ближче до меншого.

Ємність фільтруючого конденсатора визначають з допустимого рівня пульсацій напруги на конденсаторі. Вона залежить від заряду, що накопичив дросель у фазі заряду та ємності.

$$\Delta U_C = \frac{Q}{C} = \frac{t_p i_p}{C} = \frac{U_{in} t_3 t_p}{LC}$$

Коефіцієнт пульсацій

$$K_p = \frac{\Delta U_C}{U_n} = \frac{U_{in} t_3 t_p}{U_n LC}, \text{ звідки знаходимо ємність конденсатора.}$$

Для круглого дроселя на нещільно заповненому магнітному осередку, з відношенням довжини до діаметру порядку 20, індуктивність можна розрахувати за наближеною формулою

$$L = 0.75 \mu_0 l w^2$$

Завдання 2. Проектування бустерного перетворювача

1. Обрати характеристики перетворювача відповідно до варіанту
2. Оцінити граничні струми та напруги у схемі
3. Розрахувати мінімальне та максимальне значення індуктивності дроселя.
4. Для обраної індуктивності та максимального струму обчислити необхідний переріз провода, кількість витків, та оцінити паразитний опір котушки
5. Обчислити необхідне значення ємності фільтру

6. Промодельовати схему, отримати епюри перехідного та усталеного процесів у перетворювачі
7. Змінюючи коефіцієнт заповнення імпульсів керування, побудувати характеристику регулювання перетворювача та характеристику ККД. Обчислити критичний коефіцієнт заповнення.
8. Дослідити залежність характеристики регулювання від частоти перетворення
9. Дослідити залежність характеристики регулювання від опору навантаження

Варіанти 2

| | Напруга живлення, В | Вихідна напруга, В | Вихідний струм, А | Частота перетворення, кГц | Початковий коефіцієнт заповнення | Коефіцієнт пульсацій |
|----|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1 | 5 | 16 | 6 | 100 | 0,8 | 0,22 |
| 2 | 3 | 13 | 8 | 80 | 0,8 | 0,18 |
| 3 | 3 | 19 | 6 | 120 | 0,6 | 0,12 |
| 4 | 3 | 19 | 4 | 80 | 0,8 | 0,25 |
| 5 | 5 | 12 | 4 | 130 | 0,8 | 0,27 |
| 6 | 3 | 10 | 5 | 100 | 0,6 | 0,1 |
| 7 | 3 | 15 | 4 | 90 | 0,7 | 0,13 |
| 8 | 3 | 15 | 4 | 70 | 0,7 | 0,14 |
| 9 | 5 | 20 | 4 | 110 | 0,9 | 0,26 |
| 10 | 5 | 17 | 4 | 80 | 0,9 | 0,18 |
| 11 | 5 | 13 | 4 | 90 | 0,9 | 0,28 |
| 12 | 5 | 14 | 6 | 180 | 0,6 | 0,17 |
| 13 | 3 | 16 | 6 | 120 | 0,8 | 0,2 |
| 14 | 3 | 13 | 4 | 170 | 0,8 | 0,16 |
| 15 | 5 | 13 | 4 | 130 | 0,6 | 0,26 |
| 16 | 3 | 19 | 5 | 190 | 0,8 | 0,14 |
| 17 | 5 | 15 | 4 | 90 | 0,6 | 0,27 |
| 18 | 5 | 16 | 4 | 110 | 0,9 | 0,14 |
| 19 | 3 | 11 | 4 | 180 | 0,7 | 0,18 |
| 20 | 5 | 13 | 5 | 80 | 0,8 | 0,13 |

Завдання 3

Розробити схему цифрового управління перетворювачем, яка має складатись із

- Генератора пилоподібної напруги
- Зважуючого суматора із цифровими входами на 4 біти
- Аналогового компаратора

Додати схему управління до знижуючого перетворювача, промодельовати, та отримати епюри, що ілюструють цифрове керування напругою перетворювача.

Рекомендована література

1. Пейтон А. Джо, Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : БИНОМ, 1994. 352 с.
2. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : в 2 т.: пер. с англ. / У. Титце, К. Шенк. М. : Додико — XXI, 2008. Т. 1. 832 с.; Т. 2. 942 с.
3. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС : пер. с англ. / Л. Фолкенберри. М. : Мир, 1985. 572 с.
4. Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supply. Texas Instruments, SLVA057, 1999.
5. Voltage regulator down 10.0. Design Guide. Intel Corp., February 2004.
6. Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supply, Texas Instruments, SLVA061, 1999.
7. Understanding Buck Boost Power Stages in Switchmode Power Supply. Texas Instruments, SLVA061, 1999.