

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних занять з дисципліни**  
**«Пристрої живлення вимірювальної техніки»**  
для студентів спеціальності  
152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
денної і заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни **«Пристрої живлення вимірювальної техніки»** для студентів спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка денної і заочної форм навчання / Укл.: О.В. Василенко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 33 с.

Укладач: О.В. Василенко, доц., канд. техн. наук

Рецензент: Г.В. Сніжної, проф., доктор техн. наук

Відповідальний за випуск: А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук

Затверджено  
на засіданні кафедри  
мікро- і наноелектроніки

Протокол №5  
від «20» 10 2020 р.

Рекомендовано до видання  
НМК ФРЕТ  
Протокол № 3  
від «22» 10 2020 р.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                  | 5  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 “ДОСЛІДЖЕННЯ<br>ОДНОПІВПЕРІОДНОГО ВИПРЯМЛЯЧА .....                    | 6  |
| 1.1 Короткі теоретичні відомості .....                                                       | 6  |
| 1.2 Опис комп’ютерної моделі .....                                                           | 7  |
| 1.3 Програма досліджень .....                                                                | 8  |
| 1.4 Питання для самоперевірки .....                                                          | 9  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 “ДОСЛІДЖЕННЯ<br>ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ” .....                         | 10 |
| 2.1 Короткі теоретичні відомості .....                                                       | 10 |
| 2.2 Опис комп’ютерної моделі випрямляча з фільтром .....                                     | 11 |
| 2.3 Програма досліджень .....                                                                | 11 |
| 2.4 Питання для самоперевірки .....                                                          | 12 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 КЕРУВАННЯ ПРИЛАДАМИ<br>В БЛОКАХ ЖИВЛЕННЯ .....                        | 13 |
| 3.1 Основні прилади в блоках живлення .....                                                  | 13 |
| 3.2 Імпульсні методи регулювання .....                                                       | 14 |
| 3.3 Драйвери для ключів перетворювачів .....                                                 | 15 |
| 3.3.1 Типове застосування драйверів .....                                                    | 16 |
| 3.3.2 Класифікація драйверів ключів .....                                                    | 16 |
| 3.3.3 Структурна схема драйвера .....                                                        | 17 |
| 3.4 Програма досліджень .....                                                                | 18 |
| 3.5 Питання для самоперевірки .....                                                          | 19 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 "ДОСЛІДЖЕННЯ<br>ОДНОФАЗНИХ ІНВЕРТОРІВ" .....                          | 20 |
| 4.1 Короткі теоретичні відомості .....                                                       | 20 |
| 4.2 Опис комп’ютерної моделі автономного інвертора .....                                     | 21 |
| 4.3 Програма досліджень .....                                                                | 22 |
| 4.4 Питання для самоперевірки .....                                                          | 22 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 "ДОСЛІДЖЕННЯ<br>ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ<br>НАПРУГИ" ..... | 23 |
| 5.1 Короткі теоретичні відомості .....                                                       | 23 |
| 5.2 Використання ІППН в джерелах живлення .....                                              | 25 |
| 5.3 Моделі ІППН в програмі МС .....                                                          | 28 |
| 5.4 Опис комп’ютерної моделі .....                                                           | 29 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5 Програма досліджень . . . . .                                                                 | 30 |
| 5.6 Питання для самоперевірки . . . . .                                                           | 30 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ . . . . .                                                                       | 31 |
| Додаток А Моделі імпульсних регуляторів (DC/DC<br>Converters, SMPS) в програмі MicroCap . . . . . | 33 |

## ВСТУП

Курс «Пристрої живлення вимірювальної техніки» є адаптацією класичних курсів «Енергетична електроніка» / «Перетворювальна техніка» для студентів спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. **Мета:** підготовка спеціалістів, що зрозуміли і засвоїли основні поняття в галузі енергетичної електроніки: прилади, пристрої та блоки живлення вимірювальної техніки, в тому числі, інформаційно-вимірювальних систем (ІВС).

Основне **завдання дисципліни** є освоєння принципів побудови та застосування пристроїв живлення вимірювальних систем, функціонування основних перетворювачів електроенергії, які входять до блоків живлення.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен отримати

**загальні компетентності:** здатність спілкуватися державною мовою, здатність розв'язувати спеціалізовані задачі та практичні проблеми в певній галузі професійної діяльності або у процесі навчання, що передбачає застосування певних теорій та методів мікро- та наносистемної техніки і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

**фахові компетентності:** здатність демонструвати і використовувати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

### **Очікувані програмні результати навчання:**

#### **знати:**

- ❖ класифікацію та області застосування основних типів перетворювачів для блоків живлення ВС;
- ❖ принципи дії основних елементів пристроїв живлення ВС;
- ❖ методи і способи керування/регулювання в пристроях живлення;
- ❖ принцип дії, схеми і основні параметри автономних і керованих мережею джерел живлення та перетворювачів;
- ❖ принципи дії безперебійних джерел живлення.

#### **вміти:**

- ❖ обирати оптимальні пристрої живлення;
- ❖ проводити аналіз електромагнітних процесів в основних пристроях живлення ВС.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### “ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОПІВПЕРІОДНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

**Мета:** дослідити електромагнітні процеси в схемі однофазного напівперіодного випрямляча з фільтром.

#### 1.1 Короткі теоретичні відомості

Випрямлячі класифікують за такими ознаками:

**за видом перемикача (комутатора):** механічні синхронні з щітково-колекторним комутатором струму; механічні синхронні з контактним перемикачем (випрямлячем) струму; з електронною керованою комутацією струму (наприклад, тиристорні); з електронною пасивною комутацією струму (наприклад, діодні)/ ведені мережею;

**за потужністю:** силові випрямлячі; випрямлячі сигналів;

**за рівнем використання напівперіодів змінної напруги:** однопівперіодні – пропускають в навантаження тільки одну півхвилю; двопівперіодні – пропускають в навантаження обидві півхвилі; неповноперіодні – не повністю використовують синусоїдальні півхвилі; повноперіодні – повністю використовують синусоїдальні півхвилі;

**за схемою випрямлення:** мостові, з множенням напруги, трансформаторні, з гальванічною розв'язкою, безтрансформаторні тощо;

**за кількістю використовуваних фаз:** однофазні, двофазні, трифазні і багатофазні;

**за керованістю:** некеровані (діодні), керовані (тиристорні, транзисторні), за типом електронного вентиля тощо;

**за величиною випрямленої напруги:** низьковольтні (до 100 В), середневольтні (від 100 до 1000 В), високовольтні (понад 1000 В);

**за призначенням:** зварювальний, для живлення мікроелектронної схеми, для живлення силових кіл, для гальваніки тощо;

**за ступенем повноти мостів:** повномостові, напівмостові, чвертьмостові;

**за наявністю пристроїв стабілізації:** стабілізовані, нестабілізовані;

**за управлінням вихідними параметрами:** регульовані, нерегульовані;

**за способом з'єднання:** паралельні, послідовні, паралельно-послідовні;

**за частотою струму:** низькочастотні, середньочастотні, високочастотні.

Напівпровідниковий випрямляч є найбільш розповсюдженим видом напівпровідникових перетворювачів. Основні схеми:

- однофазна однопівперіодна схема
- однофазна двопівперіодна схема з нульовим виводом трансформатора (нульова схема);
- однофазна мостова схема;
- трифазна однопівперіодна схема;
- трифазна мостова схема.

Основними характеристиками керованих випрямлячів є регульовальна та зовнішня характеристики. Регульовальна характеристика описує залежність середнього значення ЕРС на виході випрямляча  $E_d$  від кута управління  $\alpha$  (при  $I_d = \text{const}$ ). Зовнішня характеристика випрямляча описує залежність середнього значення напруги на виході випрямляча  $U_d$  від вихідного струму  $I_d$  (при  $\alpha = \text{const}$ ). Для керованого випрямляча кажуть про сімейство зовнішніх характеристик, де кожна зовнішня характеристика сімейства відповідає окремому значенню кута керування  $\alpha$ .

## 1.2 Опис комп'ютерної моделі

На рисунку 1.1 показана схема напівперіодного випрямляча. Використовуючи односторонню провідність напівпровідникового діода, струм у зворотному напрямку відтинається.

При встановленні на верхній частині вторинної обмотки трансформатора полярності "+", а на нижній "-" вентиль  $D$  відкривається і струм протікає від вторинної обмотки трансформатора через навантаження  $R_L$ . При зміні полярності напруги на первинній обмотці трансформатора діод закритий і струм через навантаження не протікає.

Перевагою однонапівперіодної схеми є те, що використовується лише один діод. Недоліками даної схеми є малий ККД і велика пульсація напруги на виході. На відміну від однофазного однопівперіодного випрямляча в однофазному випрямлячі з нульовим виводом струм у навантаженні протікає двічі за період у тому ж самому напрямку.

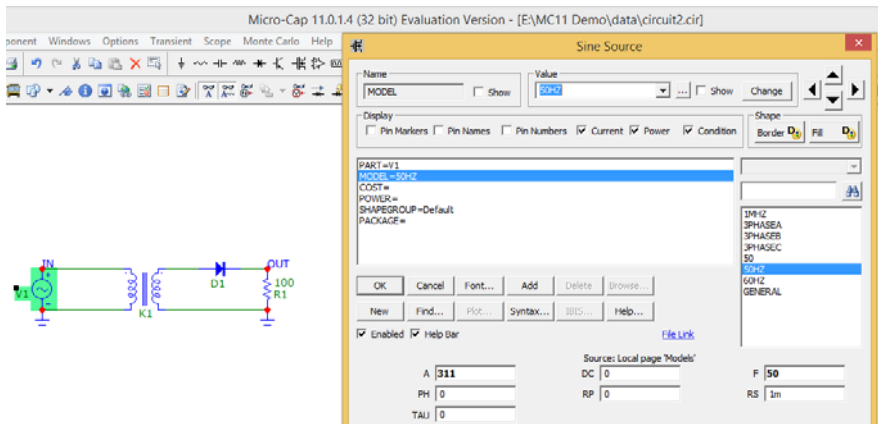


Рисунок 1.1 – Схема випрямляча та параметри вхідного джерела

### 1.3 Програма досліджень

1. Синтезувати схему однонапівперіодного випрямляча, обравши модель діода з високою напругою пробією (параметр  $BV=500$ ); для джерела V1 параметр  $A=311$  (амплітуда синусоїдного сигналу із діючим значенням 220),  $F=50$  (частота). Коефіцієнт трансформації трансформатора визначається через відношення індуктивностей вторинної до первинної обмоток та коефіцієнтом зв'язку (в даному випадку:  $1E-2, 1E-3, 0.98$ ).

2. Отримати графіки вихідної напруги і струму в режимі "Analysis" / "Transient" (рисунок 1.2).

3. Визначити середній струм (задати в меню аналізу  $AVG(I(R1))$ ).

4. Розрахувати коефіцієнт пульсацій.

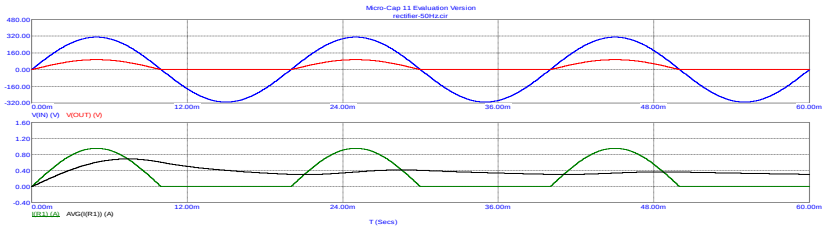


Рисунок 1.2 – Графіки вхідної, вихідної напруги, вихідного струму

3. Визначити середній струм (задати в меню аналізу  $AVG(I(R1))$ ).
4. Розрахувати коефіцієнт пульсацій.
5. Повторити експеримент при частоті вхідного джерела 50 kHz та 50 MHz (для спостереження «зриву випрямлення» при частотах, вищих за максимальну для обраного діоду).
6. Відкрити файл *MC11 Demo\Data\Mixers\mixer\_diode1.cir*, зберегти схему у звіт, запустити на аналіз "Transient", результати в звіт, прокоментувати.

#### 1.4 Питання для самоперевірки

1. Що таке випрямлення напруги.
2. Класифікація випрямлячів.
3. Застосування випрямлячів.
4. Принцип дії діоду.
5. Робота діода в однофазному напівперіодному випрямлячі.
6. Явище «зриву випрямлення»: причини, методи запобігання.
7. Чим можна «згладити» пульсації вихідної напруги на виході?
8. Які типи випрямлячів використовуються в джерелах живлення?
9. Які критерії якості використовуються при виборі випрямляча для джерела живлення?
10. Які прилади використовуються у випрямлячах керованих та некерованих?
11. Що таке коефіцієнт пульсацій?
12. Чому випрямляч це AC/DC перетворювач?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2**

### **“ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ”**

**Мета:** вивчити електромагнітні процеси в однофазних випрямлячах із фільтрами.

#### **2.1 Короткі теоретичні відомості**

Для збільшення потужності випрямленого струму широко використовуються мостові схеми. Чотири діоди в них з'єднані таким чином, що під час половини періоду працюють лише два з них, а під час наступної половини – два інші, даючи корисний струм в тому ж напрямку.

Згладжувальним фільтром випрямляча називають пристрій, призначений для зменшення змінної складової (пульсації) випрямленої напруги. Фільтри після AC/DC перетворювача використовуються для згладжування пульсацій і якість цього процесу характеризується коефіцієнтом згладжування. Коефіцієнтом згладжування називається відношення коефіцієнта пульсації на вході фільтра до коефіцієнта пульсації на виході фільтра (по навантаженню). Фільтри мають різну топологію (будову) та складаються з реактивних компонентів (ємностей та індуктивностей) та активних компонентів (транзисторів та резисторів). Якщо у фільтр входять транзистори (мікросхеми), такий фільтр називають активним, на відміну від пасивних. Фільтри із моточними елементами (індуктивними) більш дорогі.

Конденсатори, що включаються паралельно навантаженню випрямляча для згладжування пульсації вихідної напруги, істотно впливають на режим роботи всього пристрою. Найбільш суттєва особливість режиму роботи випрямляча при роботі на ємнісне навантаження – скорочення інтервалу провідності вентилів, яке призводить до імпульсного характеру анодних струмів і струмів в обмотках трансформатора. Це відбувається тому, що напруга на ємності, значення якої близько до амплітуди вторинної ЕРС, прикладена до вентилів таким чином, що вони не можуть відкритися до тих пір, поки ЕРС трансформатора не перевищить напругу на конденсаторі.

## 2.2 Опис комп'ютерної моделі випрямляча з фільтром

Для моделювання електромагнітних процесів в схемі однофазного випрямляча з ємнісним і П-подібним фільтрами використовуються комп'ютерні моделі рис.2.1, рис.2.2.

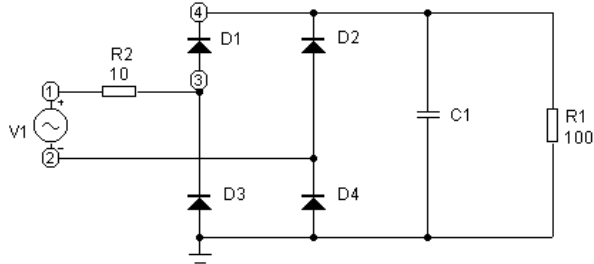


Рисунок 2.1 – Однофазний випрямляч з ємнісним фільтром

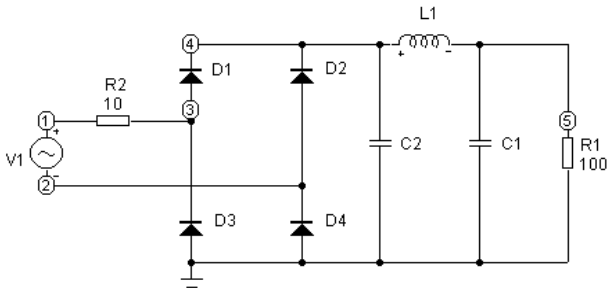


Рисунок 2.2 – Однофазний випрямляч з П-подібним фільтром.

## 2.3 Програма досліджень

1. Синтезувати модель випрямляча з ємнісним фільтром;
2. Зняти криві струмів і напруг в схемі. Для цього:
  - в режимі "*Analysis*" натиснути кнопку "*Transient*" і "*Run*".
  - для виходу з режиму "*Analysis*" досить натиснути клавішу F3.
3. Зберегти одержані криві.
4. Зняти і побудувати зовнішню характеристику випрямляча.

Для цього необхідно:

- в режимі "*Analysis*" / "*Transient*" натиснути кнопку "*Stepping*";
- "*Step what*" встановити "*R1*";

- у графі "*From*" встановити максимальну величину резистора - "500";
- графі "*To*" встановити мінімальну величину резистора - "100";
- у графі "*Step Value*" встановити необхідний крок - "400";
- у зоні "*Step it*" поставити точку "*Yes*";
- натиснути кнопку "OK" і у вікні, що відкрилося, натиснути кнопку ►.

Після завершення процесу розрахунку, зміряти сталі величини напруги на навантаженні  $RI$ , а також амплітуду першої гармоніки пульсацій;

5. За результатами моделювання побудувати зовнішню характеристику випрямляча та залежність коефіцієнта пульсацій від струму навантаження.

6. Синтезувати модель випрямляча з П-подібним фільтром. Повторити п. 2 - 5.

7. Синтезувати модель фільтру для дослідження амплітудно-частотної характеристики. Розрахувати резонансну частоту П-подібного фільтру за даними, вказаними в моделі. Використовуючи "АС" аналіз, отримати амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики фільтру.

8. Зіставити одержані залежності з теоретичними.

## 2.4 Питання для самоперевірки

1. Структура блоку живлення.
2. Місце випрямляча в пристроях живлення, його функції.
3. Що таке коефіцієнт пульсації? Як визначити коефіцієнт пульсації при ємнісному фільтрі?
4. Як працює фільтр?
5. Види фільтрів.
6. Які критерії якості фільтрів?
7. Де використовують однофазні випрямлячі.
8. Де використовують трифазні випрямлячі?
9. Переваги та недоліки однофазних мостових випрямлячів.
10. В яких ще пристроях використовують мостові схеми?
11. Що таке трансформатор, його призначення в блоках живлення. Імпульсні трансформатори.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### КЕРУВАННЯ ПРИЛАДАМИ В БЛОКАХ ЖИВЛЕННЯ

#### 3.1 Основні прилади в блоках живлення

В пристроях та системах живлення застосовують (окрім приладів мікро- та наноелектроніки) силові напівпровідникові прилади.

Прилади можна поділити на три групи:

- біполярні (діоди, біполярні транзистори, тиристори);
- польові (польові транзистори із ізольованим затвором – *MOSFET* та з керуючим переходом – *JFET*);
- гібридні (польові по входу, біполярні по виходу).

Розподілення приладів по діапазонам частот та потужності наведено на рис.3.1.

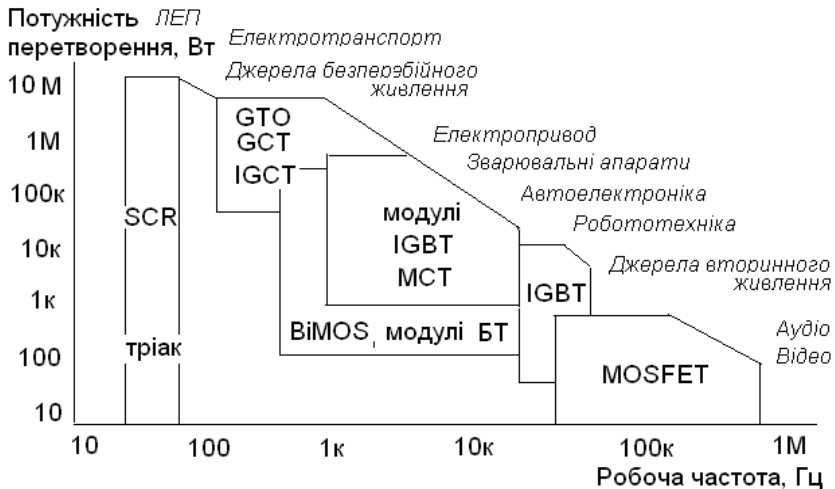
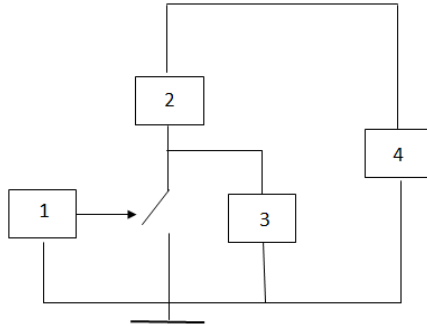


Рисунок 3.1 – Розподілення приладів по діапазонам частот та потужності

Прилади безперервно вдосконалюються в напрямку наближення за своїми статичними і динамічними характеристиками до поняття "ідеального ключа" (рис.3.2).



- 1 - драйвер (система керування, або попередній каскад);  
 2 - навантаження (наприклад, якірний ланцюг двигуна);  
 3 - снаббер/демпфер - захисний ланцюг, формувач траєкторії перемикання;  
 4 - джерело живлення (джерело постійного, або змінного струму).

Рисунок 3.2 – Структурна схема електронного ключа

### 3.2 Імпульсні методи регулювання

Імпульсні методи найбільш широко використовують для регулювання вихідних функцій (струмів, напруг, потужності), для керування приладами, що зумовлено стрімким розвитком напівпровідникових приладів, що можуть працювати у ключовому режимі. Метод *широтно-імпульсного регулювання* (ШІР) полягає у тому, що при сталому періоді надходження імпульсів змінюють їхню тривалість – ширину. У результаті маємо:

$$U_d = \frac{t_i}{T} E = \gamma E, \quad (3.1)$$

де  $E$  – ЕРС джерела постійного струму;  $t_i$  – тривалість імпульсу;  $T$  – період імпульсів;  $\gamma$  – коефіцієнт заповнення.

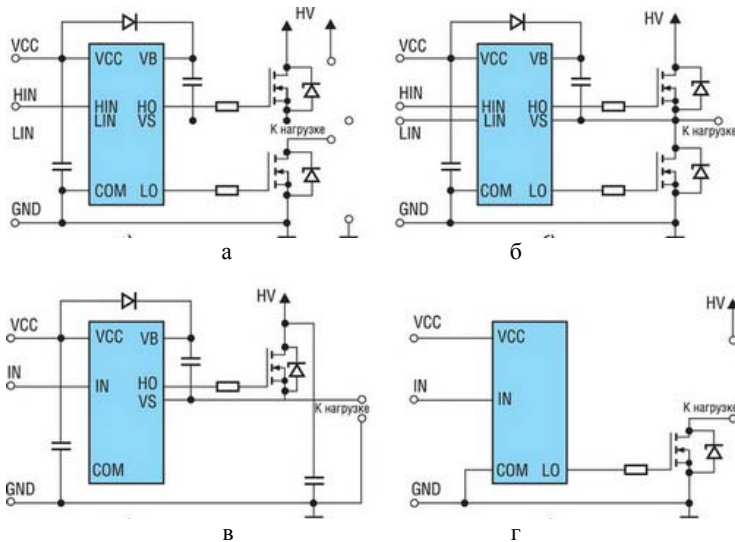
$$\gamma \equiv \frac{t_i}{T} = (0 \dots 1) \quad (3.2)$$

При зміні  $\gamma$  напруга  $U_d$  змінюється від нуля (при  $\gamma = 0$ ) до  $E$  (при  $\gamma = 1$ ).

### 3.3 Драйвери для ключів перетворювачів

Польові *MOSFET*-транзистори і біполярні транзистори з ізолюваним затвором (*IGBT*-транзистори) є базовими елементами потужних блоків живлення. Однак для узгодження низьковольтних логічних керуючих сигналів з рівнями управління затвора *MOSFET* та *IGBT*-транзисторів потрібні проміжні пристрої узгодження – високовольтні драйвери (надалі, для стислості, під «високовольтними драйверами» будемо розуміти «високовольтні драйвери *MOSFET* та *IGBT*-транзисторів»).

На рис. 3.3 показані відповідні цим типам драйверів схеми управління: незалежні драйвери верхнього і драйвери нижнього плеча напівмоста, інтегровані в одній мікросхемі (*High and Low Side Driver*) (рис. 3.3, а); драйвери верхнього і драйвери нижнього плеча, включені за схемою напівмоста (*Half-Bridge Driver*) (рис. 3.3 , б); драйвери верхнього плеча (*High Side Driver*) (рис. 3.3, в); драйвери нижнього плеча (*Low Side Driver*) (рис. 3.3, г).



а) High and Low Side Driver; б) Half-Bridge Driver;  
в) High Side Driver; г) Low Side Driver

Рисунок 3.3 – Драйвери для керування силовими ключами:

### 3.3.1 Типове застосування драйверів

Типове застосування (Typical Applications):

- імпульсні блоки живлення серверів (Server SMPS);
- імпульсні блоки живлення для телефонії (TeleCom SMPS);
- перетворювачі постійного струму (DC-to-DC Converter);
- незалежні, окремі джерела живлення (Bricks);
- Інструменти (Power Tools);
- промислові блоки живлення (Industrial SMPS);
- керування двигунами (Motor Control);
- автономні джерела в фотовольтаїці (Solar SMPS).

### 3.3.2 Класифікація драйверів ключів

Класифікація драйверів ключів:

**За застосуванням:**

в основних побутових приладах;

у приводах;

у дрібних побутових приладах;

в електричних та гібридних транспортних засобах;

в зарядних пристроях для електричних транспортних засобів;

в легких електричних транспортних засобах;

в освітленні;

в імпульсних стабілізаторах напруги (SMPS);

у джерелах безперебійного живлення;

у відновлювальній енергії.

**За перемикаючим пристроєм:**

драйвери затвору MOSFET;

драйвери затвору IGBT;

драйвери затвору CoolSiC MOSFET;

драйвери затвору CoolGaN HEMTs.

**За ізоляцією:**

ізольовані;

не ізольовані (N-ISO);

зсув рівня ізоляції переходу (JI) та кремній на ізоляторі (SOI).

**За конфігурацією:**

для низької напруги (low side);

для високої напруги(high side);  
 для будь-якої напруги(high and low side);  
 напівмостові (half bridge);  
 мостові (full bridge);  
 трифазні (three phase);  
 синхронно-понижуючий (synchronous-buck);  
 драйвер для підтримки ICs (gate driver support ICs);  
 плати драйверів (driver boards).

Більше інформації на цю тему можна знайти перейшовши за посиланнями [].

### 3.3.3 Структурна схема драйвера

На рис. 3.4 зображено структурну схему драйвера 2EDN752x / 2EDN852x [].

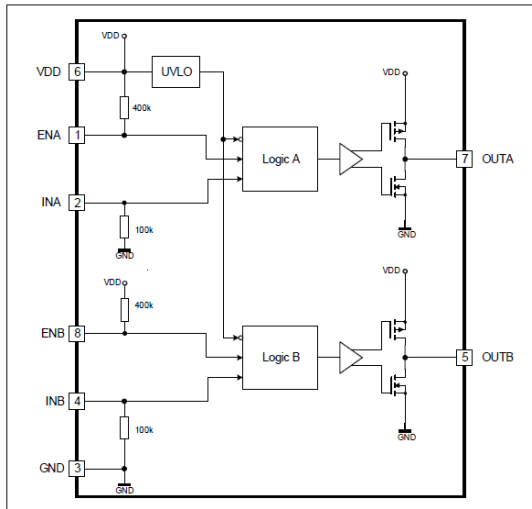


Figure 4 Block Diagram, direct input, pull-up/pull-down resistor configuration

Рисунок 3.4 – Блок-схема драйвера EiceDRIVER™

2EDN752x / 2EDN852x – це швидкий двоканальний драйвер для низьковольтних ключів (*low-side switches*). Вибрано два справжні вихідні каскади повного діапазону зміни напруги від + до – (*rail-to-rail*) з дуже низьким вихідним опором та високою струмовою здатністю, щоб забезпечити найвищу гнучкість та охопити широкий

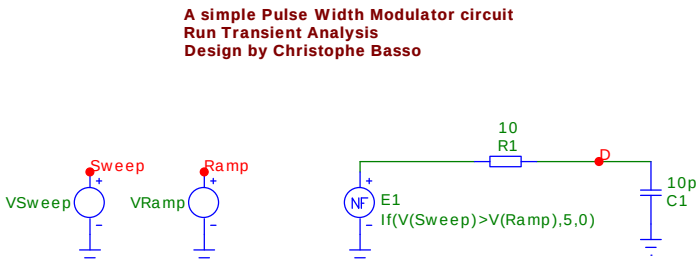
спектр застосувань.

Зосередження уваги на надійності на вхідній та вихідній сторонах (*robustness at the input and output side*) додатково надає цьому пристрою запас міцності в критичних ситуаціях. Розширений діапазон негативної напруги захищає входи від випадкового закорочення на землю. Струм не протікає по структурі *ESD* в мікросхемі під час негативного рівня вхідного сигналу. Всі виходи захищені від зворотного струму. Всі входи сумісні з рівнями сигналу *TTL*. Порогові напруги при типовому гістерезисі 1,1 В підтримуються постійними в діапазоні напруги живлення.

Оскільки 2EDN752x / 2EDN852x націлений, зокрема, на швидкі комутаційні програми, затримки сигналу та час зростання / падіння були мінімізовані. Спеціальні зусилля було докладено до мінімізації різниць затримки між 2 каналами до дуже низьких значень, як правило, до 1 нс.

### 3.4 Програма досліджень

1. Завантажити з бібліотеки програми MC файл *PWM Modulator.cir* (рис.3.4).



This sketch pictures a simple Pulse Width Modulator (PWM)  
 - observe the duty-cycle excursion on D: V(D)  
 - note how to build a simple comparator with E1  
 - the R1-C1 networks improves convergence by offering a realistic switching time

Рисунок 3.5 – Модель PWM контролера

2. Провести аналіз перехідних характеристик, отримати криві для вхідного та вихідного струму.

3. Описати роботу моделі, розробити концепцію його функціонування.
4. Навести приклади застосування ШІМ контролерів у звіті.
5. Розібрати структуру драйверу для керування MOSFET фірми *Infineon*, описати концепцію його роботи.

### 3.5 Питання для самоперевірки

1. Що таке ключовий прилад?
2. Що таке ідеальний ключ?
3. Які тенденції розвитку елементної бази для блоків живлення?
4. Що таке імпульсне джерело живлення? Його переваги.
5. Якими характеристиками мають володіти ідеальні джерела живлення?
6. Які тенденції розвитку пристроїв живлення?
7. Принципи ШІМ регулювання.
8. Навести приклади застосування ШІМ регулювання в блоках живлення.
9. Що таке драйвер?
10. Класифікація драйверів.
11. Функціонування драйверів (принцип дії).
12. Чим можна замінити мікросхеми драйверів?
13. Область застосування драйверів.
14. Що таке канал керування?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### "ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ІНВЕРТОРІВ"

**Мета:** вивчити електромагнітні процеси в однофазному інверторі керованому мережею, виконаному по схемі з виводом нульової точки та в автономному інверторі струму, дослідити їхні характеристики.

#### 4.1 Короткі теоретичні відомості

Інвертори використовуються в джерелах живлення, коли є необхідність від джерела постійного струму (наприклад, акумуляторної батареї) отримати синусоїдний (квазісинусоїдний) сигнал для живлення апаратури. Інвертуванням називають процес перетворення енергії постійного струму в енергію змінного струму. Інвертори керовані мережею здійснюють таке перетворення з передачею енергії в мережу змінного струму, тобто вирішують задачу зворотну (інверсну) відносно випрямленню.

Керовані мережею інвертори виконують по тих же схемах, що і керовані випрямлячі. Відмінність полягає в тому, що замість навантаження підключається машина постійного струму, що працює в генераторному режимі, а на вході - індуктивність, що згладжує вхідний струм інвертора.

Таким чином, для перевodu випрямляча в інверторний режим необхідно:

- підключити джерело постійного струму з полярністю, зворотною режиму випрямлення;
- забезпечити протікання струму через тиристори переважно при негативній полярності вторинних напруг, проводячи їх відмикання з кутом випередження  $\beta$ .

Слід зазначити, що такий спосіб перетворення не є єдино можливим. Для нього характерне збереження колишнього напрямку струму і зміна полярності постійної напруги. Також може бути реалізований режим збереження полярності постійної напруги і зміни полярності струму. Обидва ці режими використовуються в реверсивних перетворювачах [1,2].

Автономні інвертори поділяються на інвертори струму і напруги

(окрім інших критеріїв для класифікації). Залежно від того, як включений конденсатор по відношенню до навантаження, інвертори струму і напруги поділяються на паралельні, послідовні і послідовно-паралельні. У паралельному інверторі комутуючий конденсатор підключається паралельно навантаженню.

Інвертор струму отримує живлення від джерела струму, для чого в ланцюг постійного струму включена досить велика індуктивність  $L$ , і тому форма вихідного струму визначається тільки порядком перемикання ключів, а форма напруги залежить від характеру навантаження. Форма кривої струму передбачає можливість миттєвого зміни струму в ланцюзі навантаження, що неможливо, якщо навантаження інвертора носить індуктивний характер. Однак, якщо навантаження зашунтувати конденсатором досить великої ємності, то миттєва зміна струму виявляється можливою. Таким чином, загальне навантаження інвертора струму має ємнісний характер. При цьому конденсатор повинен компенсувати не тільки реактивну потужність навантаження, а й інвертора.

## 4.2 Опис комп'ютерної моделі автономного інвертора

Схема для дослідження автономного інвертора струму наведена на рис.4.1.

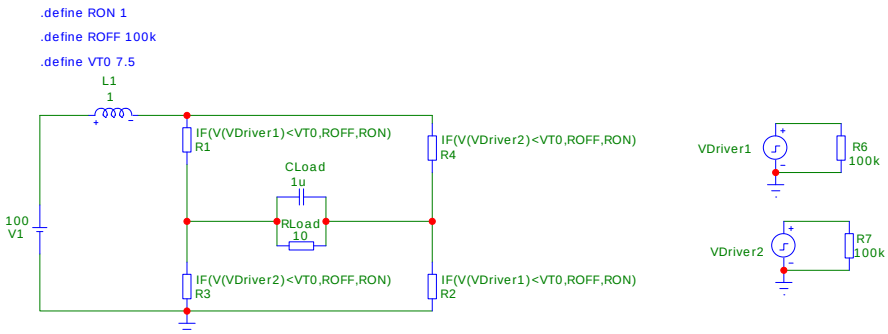


Рисунок 4.1 – Модель автономного інвертора струму

Замість активних елементів (наприклад, MOS FET, IGBT), для простоти в схемі моста використано резистори R1-R4, опори яких змінюються в залежності від сигналів схем керування (драйверів

VDriver1, VDriver2) за наступним алгоритмом: коли приходить високий рівень напруги, більший за половину від рівня «логічної одиниці» (прописаний як параметр  $VT0=7.5$  в операторі define), опір стає рівним RON (маленький опір включеного приладу), в іншому випадку, стає рівним ROFF (великий опір вимкненого приладу), що також прописано у відповідних операторах define.

### 4.3 Програма досліджень

1. Синтезувати схему рис.4.1.
2. Отримати графіки перехідних процесів (напруги і струму) на ємності навантаження.
3. Занести в звіт інформацію про місце інверторів в автономних джерелах живлення, де саме використовуються такі джерела.
4. Занести в звіт інформацію про альтернативні джерела енергії, показати тенденції їхнього розвитку, дати цифри по динаміці заміни такими джерелами традиційних джерел (атомну, гідро-, теплову енергетику).

### 4.4 Питання для самоперевірки

1. Що таке інвертування?
2. Як перевести випрямляч в інверторний режим?
3. Як працює схема керованого мережею інвертора з виводом нульової точки?
4. Що таке вхідна характеристика інвертора?
5. Використання інверторів в автономних системах енергопостачання.
6. Класифікація інверторів.
7. Застосування автономних інверторів.
8. Зобразити структурну схему автономного джерела живлення в фотovoltaїці. Показати місце інверторів в них.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### "ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ"

**Мета:** дослідити електромагнітні процеси в схемах  $S$ -моделей та частотні характеристики  $A$ -моделей імпульсних перетворювачів постійної напруги підвищувального (*Boost Converter*) та знижувального (*Buck Converter*) типів.

#### 5.1 Короткі теоретичні відомості

Імпульсні перетворювачі постійної напруги (*DC/DC Converters*), вони використовуються в блоках живлення апаратури із імпульсним принципом регулювання вихідної величини (*Switch Mode Power Supply – SMPS*).

Імпульсний перетворювач постійної напруги (ІППН) можна віднести до системи автоматичного регулювання струму, або напруги. В англomовній технічній літературі ці пристрої отримали назву імпульсних регуляторів (IP), імпульсних стабілізаторів та відносяться до класу *SMPS*, тобто потужних пристроїв, що працюють в ключовому режимі, саме так і називається підрозділ бібліотеки програми *MC*, де зберігаються макромоделі ІППН.

Схему простого і найбільш відомого імпульсного регулятора наведено на рис. 5.1, *a*. Тут силовий ключ, дросель і навантаження увімкнені послідовно. Дросель  $L$  з конденсатором  $C$  утворюють  $\Gamma$ -подібний  $LC$ -фільтр.

При замкненому ключі  $K$  навантаження  $R_L$  живиться від джерела постійного струму  $E$  (тече струм  $i_d'$ ), а елементи фільтра накопичують енергію. Коли ключ розімкнутий, то навантаження живиться енергією, накопиченою в конденсаторі і дроселі. Для забезпечення передачі енергії, накопиченої в дроселі, у навантаження (протікання струму  $i_d''$ ), в схему введено діод  $VD$ , який називають зворотним. Діапазон регулювання вихідної напруги складає від 0 до значення напруги джерела живлення.

Цей регулятор є **регулятором знижуючого типу**. Його ще називають **чоппер** (англ. *chopper* – переривач, або *buck converter*, *step-*

*down converter* – знижуючий перетворювач).

Змінюючи порядок з'єднання елементів регулятора, можна отримати ще дві схеми.

Так схему регулятора з вмиканням дроселя послідовно з навантаженням, а ключа паралельно до нього наведено на рис. 5.1, б. Цей регулятор дозволяє отримати значення напруги на навантаженні  $U_d$  більші за напругу джерела живлення  $E$ . Тому його називають **регулятором підвищуючого типу** або **бустером** (англ. *boost converter* або *step-up converter* – підвищуючий перетворювач).

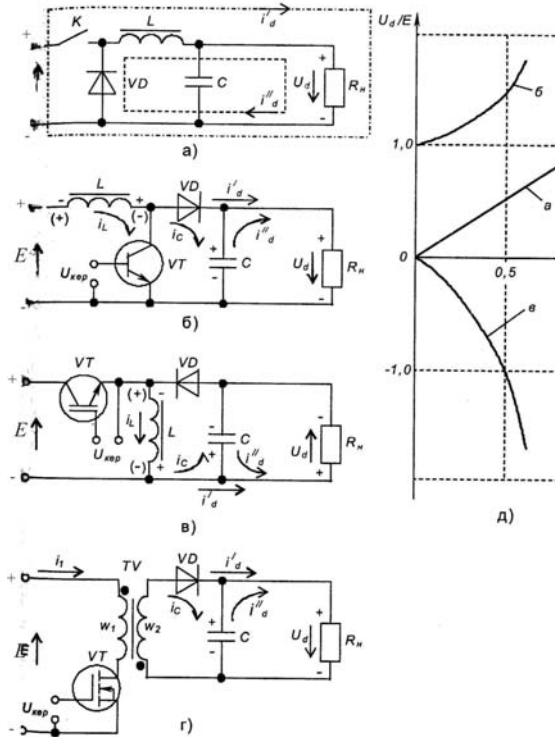
Тут при замкненому ключі (оскільки ключем є біполярний транзистор  $VT$ , то замкненому стану ключа відповідає увімкнений стан транзистора) дросель  $L$  включається до джерела живлення  $E$  і через нього протікає експоненційно зростаючий струм  $i_L$  (перехідний процес). За рахунок цього в дроселі накопичується енергія. Полярність напруги на дроселі вказана у дужках. Після розмикання ключа (при вимиканні транзистора  $VT$ ) відкривається діод  $VD$  і конденсатор емнісного фільтра  $C$  заряджається під дією напруги, що дорівнює сумі напруг джерела живлення  $E$  і ЕРС самоіндукції дроселя. Полярність останньої вказано без дужок. Протікають струм зарядки конденсатора  $i_C$  та струм навантаження  $i'_d$ . При наступному замиканні ключа діод закривається під дією напруги на конденсаторі. Дросель знову накопичує енергію, а навантаження живить за рахунок енергії, накопиченої в конденсаторі – протікає струм  $i''_d$ .

Схему регулятора з вмиканням дроселя паралельно до навантаження, а ключа послідовно з ним наведено на рис. 5.1, в. Такий регулятор називають **регулятором інвертуючого типу** (англ. *buck-boost converter*), бо він дозволяє отримувати на навантаженні напругу полярністю, протилежною до полярності напруги джерела живлення. При цьому значення напруги на навантаженні можуть бути більші, так і менші за напругу джерела живлення.

При замиканні ключа (яким тут є IGBT  $VT$ ) дросель  $L$  під'єднується до джерела живлення і за рахунок протікання струму  $i_L$  в ньому накопичується енергія. Полярність напруги на дроселі вказана у дужках. При розмиканні ключа (вимиканні транзистора  $VT$ ) відкривається діод  $VD$  і енергія, накопичена в дроселі, за рахунок протікання струму  $i_C$  передається в конденсатор, а за рахунок протікання струму  $i'_d$  в навантаження. При наступному замиканні

ключа діод закривається, знову накопичується енергія в дроселі, а навантаження живиться енергією, накопиченою в конденсаторі – через навантаження тече струм  $i_d''$ .

Регулювальні характеристики розглянутих регуляторів показано на рис. 5.1,  $\delta$ , де їх відповідно позначено літерами  $a$ ,  $b$  і  $\bar{v}$ .



$a$  – знижуючого;  $\bar{b}$  – підвищуючого;  $\bar{v}$  – інвертуючого типів;  
 $z$  – зворотногоходовий;  $\delta$  – їхні регулювальні характеристики  
 Рисунок 5.1 – Імпульсні регулятори напруги постійного струму:

## 5.2 Використання ІППН в джерелах живлення

Системи електроживлення за будовою можна поділити на: централізовані та децентралізовані (розподілені). Централізована система (рис. 5.2) містить один потужний, великогабаритний

перетворювач постійної напруги, який формує на виходах всі необхідні рівні напруг та струмів. ППН використовуються в джерелах вторинного електроживлення, в джерелах безперебійного живлення ДБЖ / *UPS-Uninterruptible Power Supply* (автономних системах) в якості схем корекції коефіцієнта потужності, в блоках заряду-розряду акумуляторів.

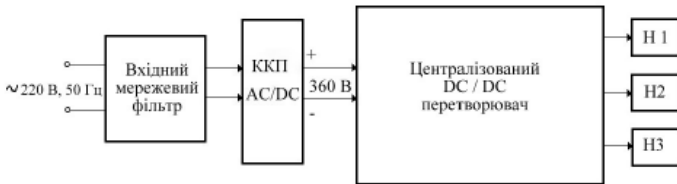


Рисунок 5.2 – Централізована система джерела живлення

Тут використані позначення:

ККП – коректор коефіцієнта потужності; Н – навантаження

Структурні схема ДБЖ із подвійним перетворенням енергії наведені на рис.5.3.

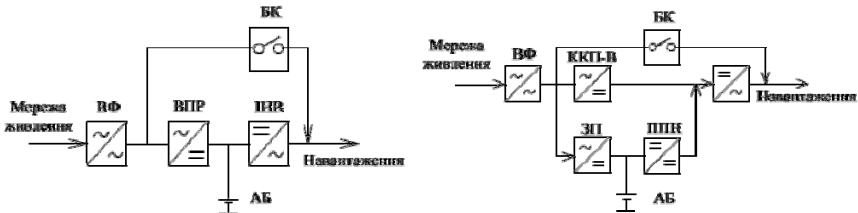


Рисунок 5.3 – Структурні схема ДБЖ із подвійним перетворенням енергії

ДБЖ із подвійним перетворенням і коректором коефіцієнта потужності використовується у однофазних ДБЖ потужністю до 3 кВА й містить блок коректора коефіцієнта потужності, поєднаного з некерованим випрямлячем (ККП-В), блок зарядного пристрою (ЗП), імпульсний перетворювач постійної напруги (ППН). ККП-В забезпечує перетворення напруги мережі змінного струму в стабільну напругу постійного струму. Цим досягається практично синусоїдальна форма струму, яка споживається з мережі, що дозволяє мати вхідний коефіцієнт потужності близьким до одиниці; ЗП формує необхідну напругу заряду акумуляторної батареї, номінальне значення якої

обирається залежно від потужності ДБЖ і перебуває в межах від 36 до 96 В; ІППН забезпечує узгодження напруги батареї з високовольтною напругою живлення інвертора й розрахований на максимальну потужність навантаження.

Функціональну схему джерела живлення на базі ІППН знижувального типу / чоппера, наведено на рис.5.4.

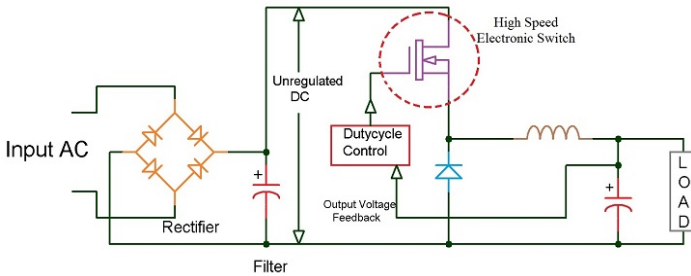


Рисунок 5.4 – Функціональна схема джерела живлення на базі чоппера

В цій схемі випрямлений струм до чоппера є нерегульованим, а на навантаженні (*Load*) рівень сигналу регулюється завдяки ШІМ-керуванню силовим транзистором *IGBT*.

Поширена структура джерела вторинного електроживлення (AC/DC) для електронних пристроїв наведена на рис.5.5.

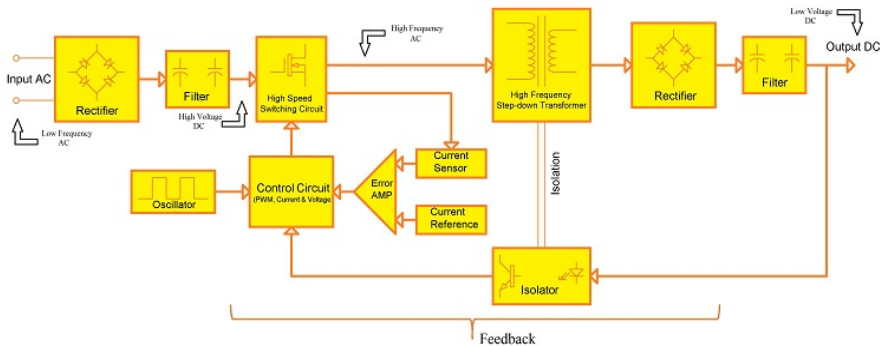


Рисунок 5.5 – Структурна схема джерела живлення для мікроелектронних пристроїв

### 5.3 Моделі ІППН в програмі MC

Програми ECAD мають в своїх бібліотеках набір макромоделей для ІППН різних типів. Основний розподіл макромоделей – по типу перетворювача, роботу якого вони мають моделювати. Крім макромоделей основних ІППН різного роду, наприклад, знижувального та підвищувального типів (*Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*), до бібліотеки занесено макромоделі й інших перетворювачів (Додаток Б).

В MC11 існує два способи моделювання ІППН: за допомогою *Switch* (ключових) та *Averaged* (усереднених) макромоделей, на належність до певного типу вказує префікс *A\_* або *S\_* у назвах файлів перетворювачів. В робочих папках CAD-програм вкладено готові для аналізу схеми: в них є навантаження, джерела живлення, контролер й перетворювач, представлений в *Averaged* моделях «чорним ящиком», схеми яких можна проглянути при переході в інформаційний режим. Існує також поділ за режимом контролю: за струмом (*current mode* – *CM*), або по напрузі (*voltage mode* – *VM*). Назви файлів мають інформативний характер та відображають властивості макромоделі згідно наведеної класифікації: наприклад, файл *A\_BUCK\_VM* вміщує усереднену макромодель перетворювача знижувального типу, в режимі контролю вихідної напруги.

*Switch* – макромоделі створені із урахуванням усіх нелінійностей, які властиві транзисторам, вентиллям, трансформаторам, дроселям; їхнє використання обмежується режимами розрахунку перехідних характеристик. Однак, при редагуванні бібліотечних моделей та подальшому моделюванні перехідних характеристик за допомогою ключових макромоделей можливі проблеми незбіжності, що є слідством поганої обумовленості моделі схеми (підвищеної жорсткості математичної моделі схеми ММС).

В *Averaged*-макромоделях немає ключових елементів, функціонування пристрою в режимі малого сигналу описано квазістатичним нелінійним рівнянням із параметричними коефіцієнтами, які залежать від коефіцієнту заповнення. Ці економічні макромоделі набули найбільшого поширення, їх використовують для дослідження ІР в частотному діапазоні.

У моделях перетворювачів центральне місце займає інкапсульована макромодель системи управління – ядро, де

управління здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення, так звана «широтно-імпульсна» модуляція – *PWM*. У ключових макромоделях кількість виводів СК дорівнює кількості виводів у реальних мікросхемах, сама модель СК набагато складніша, ніж в усереднених макромоделях. Як правило, при проектуванні ІППН спочатку здійснюється аналіз за допомогою усереднених макромоделей, а потім – за допомогою ключових.

## 5.4 Опис комп'ютерної моделі

Із ціллю порівняння двох типів макромоделей, схеми заміщення їхніх Spice-макромоделей та результати моделювання для Buck-конвертера (ІР знижувального типу) в форматі MC11 наведено на рис.5.6 та 5.7 відповідно.

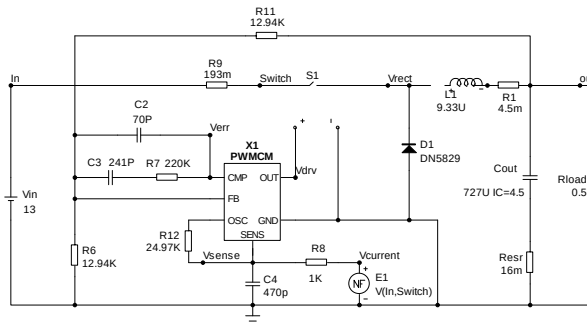


Рисунок 5.6 – Перетворювач знижувального типу S-модель

RI=1 L=60U RS=50M FS=200K VOUT=2.5 RL=5 VIN=4.8 MC=1 VR=1

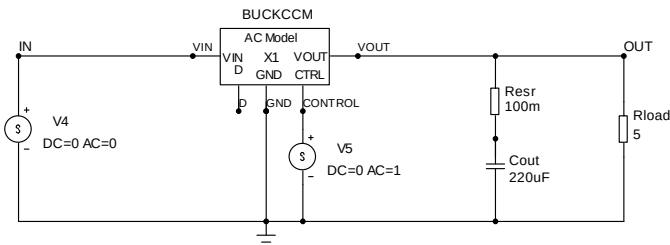


Рисунок 5.7 – Перетворювач знижувального типу A-модель

У моделях перетворювачів центральне місце займають

інкапсульовані макромоделі систем керування (СК), названих нами ядром. У ключових макромоделях кількість виводів СК дорівнює кількості виводів у реальних мікросхемах, сама модель СК набагато складніша, ніж в усереднених макромоделях.

### 5.5 Програма досліджень

1. Дослідити вихідний струм та напругу в ІППН підвищувального та знижувального типів (ключові *S*-моделі) в програмі MC11.
2. Оцінити час виходу ІППН в стаціонарний режим, пульсації та частоту ШІМ.
3. Отримати частотні характеристики ІППН підвищувального та знижувального типів (усереднені *A*-моделі) в програмі MC11.
4. Знайти частоту Найквіста, оцінити фазу та амплітуду коефіцієнта передачі.

### 5.6 Питання для самоперевірки

1. Призначення/використання ІППН.
2. Блоки живлення: структура, місце ІППН для підвищення якості вихідного сигналу.
3. Принцип широтно-імпульсної модуляції.
4. ІППН як система автоматичної регуляції – структура, принцип дії.
5. Класифікація ІППН.
6. Прилади, які використовуються в якості ключів в ІППН.
7. Особливості моделювання ІППН в ECAD.
8. Зобразите структуру автономної системи заряджання/освітлення від фотобатареї на основі ІППН.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Бойко, В.І.** Основи технічної електроніки: У 2-х книгах: Підручник для студ. вищ. техн. навч. закл. Кн. 2: Схемотехніка. [Текст] / В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.М. Співак, В.Я. Жуйков, А.А. Зорі. – К.: Вища шк., 2007. – 510 с.
2. **Будіщев, М. С.** Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник. [Текст] / М. С. Будіщев. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. **Василенко, О.В.** Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Енергетична електроніка» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“ денної та заочної форм навчання /Укл.: О.В. Василенко – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 78 с.
4. **Кашкаров, А. П.** Импульсные источники питания: схемотехника и ремонт. [Текст] / А. П. Кашкаров– М.: ДМК Пресс, 2012. – 184 с.
5. **Шустов, М.А.** Практическая схемотехника. Кн. 3: Преобразователи напряжения [Текст] / М.А. Шустов– 2-е изд., стереотип. – М.: Додэка-XXI: Альтекс, 2007. – 192 с.
6. **Василега, П.О.** Електропостачання: навч. посібник [Текст] / П.О. Василега – Суми: ВТД "Університетська книга", 2008. – 415 с.
7. **Сенько, В.І.** Електроніка і мікросхемотехніка: у 4 т. : підручник для вузів. Т. 1: Елементна база електронних пристроїв [Текст] / В.І.Сенько, М.В.Панасенко, С.В. Сенько – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
8. **Голубев, В.В.** Импульсное преобразование переменного напряжения [Текст] / В.В. Голубев – Киев: Наукова думка, 2014. – 248 с
9. **Матвійків, М. Д.** Елементна база електронних апаратів: підручник для студентів вищ. навч. закладів. [Текст] / М. Д. Матвійків, В. М. Когут, О. М. Матвійків, 2-ге вид. – Львів: Львівська Політехніка, 2007. – 428 с.
10. **Півняк, Г.Г.** Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: навч. посібник [Текст] / Г.Г.Півняк, Г.А. Кігель, Н. С. Волотковська, за ред. Г. Г. Півняка. – 2-е вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 219 с.

11. **Праховник, А.В.** Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения [Текст] /А.В. Праховник– К.: Освіта України, 2007. – 464с.
12. Справочник по преобразовательной технике / под ред. И. М. Чиженко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.znvo.kz/books/43-preobrazovanie/566-chijenko.pdf>
13. Power MOSFET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/>
14. Every switch needs a driver. Gate driver application matrix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application\\_Matrix\\_Gate\\_Driver\\_ICs-ABR-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4626102d35a016102e1cee20036](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application_Matrix_Gate_Driver_ICs-ABR-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626102d35a016102e1cee20036)
15. Gate Driver ICs - Infineon Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/>
16. EiceDRIVER™ 2EDN752x / 2EDN852x [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDN752x-2EDN852x-DS--DS-v02\\_05-EN.pdf?fileId=5546d462525dbac40152abcc7dbb1727](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDN752x-2EDN852x-DS--DS-v02_05-EN.pdf?fileId=5546d462525dbac40152abcc7dbb1727)

**Додаток А**  
**Моделі імпульсних регуляторів (DC/DC Converters, SMPS) в програмі MicroCap**

| Ім'я файлу схеми | Тип перетворювача                                          | Модель ядра |
|------------------|------------------------------------------------------------|-------------|
| S_2FLY_CM        | Зворотноходовий двоключевий                                | 2SWITCHCM   |
| S_2FOR_CM        | Прямоходовий двоключевий                                   | 2SWITCHCM   |
| S_BOOST_CM       | Підвищувальний<br>(контроль за струмом)                    | PWMCM       |
| S_BOOST_VM       | Підвищувальний<br>(контроль за напругою)                   | PWMVM       |
| S_BUCK_CM        | Знижувальний із ключем та діодом                           | PWMCM       |
| S_BUCK_SYN       | Знижувальний синхронний із р- і n-канальними MOSFET        | PWMVM       |
| S_BUCK_SYN2      | Знижувальний синхронний із р- и n-канальними MOSFET        | PWMCM       |
| S_FLYBACK_CM     | Зворотноходовий<br>одноключевий<br>(контроль за струмом)   | PWMVM       |
| S_FLYBACK_VM     | Зворотноходовий<br>одноключевий<br>(контроль за напругою)  | PWMVM       |
| S_FORWARD_CM     | Прямоходовий одноключевий<br>(контроль за струмом)         | PWMCM       |
| S_FORWARD_VM     | Прямоходовий одноключевий<br>(контроль за напругою)        | PWMVM       |
| S_FULL_XFMR      | Мостова, верхні ключі<br>управляються ч/з<br>трансформатор | PUSH_CM     |
| S_HALF_XFMR      | Напівмостова, верхні ключі<br>керується ч/з трансформатор  | PUSH_CM     |
| S_PUSH_CM        | Двохтактна прямоходова<br>(контроль за струмом)            | PUSH_CM     |
| S_PUSH_VM        | Двохтактна прямоходова<br>(контроль за напругою)           | PUSH_VM     |