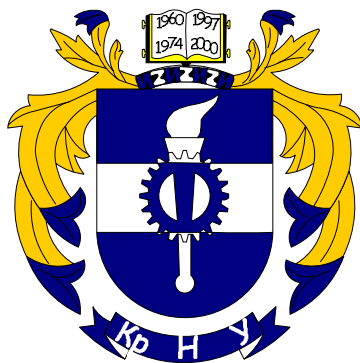


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ  
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ  
**«СИЛОВА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА»**  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ  
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ  
141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»  
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

КРЕМЕНЧУК 2019

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Силова перетворювальна техніка» для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладач к. т. н., доц. В. О. Мельников

Рецензент к. т. н., доц. В.О. Огарь

Кафедра систем автоматизованого управління та електропривода

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Голова методичної ради \_\_\_\_\_ проф. В. В. Костін

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Рекомендації щодо виконання та оформлення контрольної роботи.....	6
2 Завдання для виконання контрольної роботи.....	7
Завдання № 1 Розрахунок параметрів однофазного мостового випрямляча .....	7
Завдання № 2 Розрахунок параметрів транзисторних перетворювачів постійного струму .....	14
Завдання № 3 Розрахунок параметрів перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму .....	21
3 Критерії оцінювання знань студентів .....	30
Список літератури.....	31
Додаток А Параметри напівпровідникових ключів .....	32
Додаток Б Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи .....	36

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Силовa перетворювальна техніка» акцентує увагу на питаннях важливої складової електротехнічних систем – перетворювальної техніки систем автоматизованого електропривода; на методах аналізу та оцінювання впливу пристроїв на енергопостачальну мережу і навантаження.

Метою вивчення навчальної дисципліни «Силовa перетворювальна техніка» є підготовка студентів широкого профілю, здатних самостійно розв'язувати завдання проектування і дослідження сучасних систем електропривода з використанням напівпровідникових пристроїв регулювання і керування, а також вироблення вміння аналізувати енергетичні процеси у системах електропривода з вентильними перетворювальними пристроями та вибору найбільш раціональних систем.

Завдання навчального курсу «Силовa перетворювальна техніка» – забезпечити базу для вивчення інших навчальних дисциплін, пов'язаних з технічною реалізацією перетворювальних пристроїв систем автоматизованого електропривода.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

**знати:**

- загальні принципи побудови силових перетворювачів;
- принципи побудови та режими роботи керованих випрямлячів;
- принципи побудови та режими роботи інверторів, ведених мережею;
- принципи побудови та режими роботи реверсивних керованих випрямлячів;
- принципи побудови та режими роботи широтно-імпульсних перетворювачів;
- принципи побудови та режими роботи тиристорних регуляторів змінної напруги;
- принципи побудови та режими роботи автономних інверторів;
- принципи побудови та режими роботи перетворювачів частоти;

– методи одержання математичного опису силових перетворювачів для систем керування електроприводом;

– методику вибору елементів схем силових перетворювачів;

***уміти:***

– виконувати розрахунки елементів перетворювальних пристроїв;

– аналізувати режими роботи пристроїв і вирізняти пошкодження у схемах;

– виконувати розрахунок показників якості перетворювачів;

– виконувати розрахунок характеристик перетворювальних пристроїв;

– синтезувати нові системи перетворювальних пристроїв;

– визначити найбільш доцільні схеми пристроїв для конкретних схем систем електропривода;

– виконувати розрахунок і вибір технічних засобів для реалізації перетворювачів.

# 1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Звіт з контрольної роботи повинен містити титульну сторінку та основну частину. Приклад оформлення титульної сторінки наведено у додатку Б. Титульна сторінка оформлюється лише українською мовою. Контрольну роботу виконують державною мовою, приблизний обсяг – 8–10 сторінок у друкованому варіанті або 10–15 сторінок – у рукописному.

Номер варіанта контрольної роботи визначається за порядковим номером студента в академічному журналі групи.

Звіт з контрольної роботи оформлюється на аркушах форматом А4 (210x297мм) у текстовому редакторі Microsoft Word. Розміри полів відступу такі: верхнє, праве, нижнє – 20 мм, ліве – 25 мм. Шрифт Times New Roman – 14 пт; міжрядкова відстань – полуторна, відступ першого рядка – 1,25 см. Наповненість сторінки має становити 75 % від її загального обсягу. Сторінки роботи нумеруються арабськими цифрами від центру зі збереженням наскрізної нумерації всього тексту. Титульну сторінку теж включають до нумерації, але номер сторінки на ній не ставлять.

Ілюстрації необхідно розміщувати безпосередньо після тексту, у якому вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. Ілюстрації нумеруються арабськими цифрами (нумерація наскрізна) та вказується «Рисунок», що разом з назвою ілюстрації розміщується під рисунком посередині рядка (наприклад: Рисунок 1 – Схема силової частини некерованого однофазного випрямляча).

Цифровий матеріал зазвичай оформлюють у вигляді таблиць. Таблицю слід розміщувати безпосередньо після тексту, у якому вона згадується вперше, або на наступній сторінці. Таблиці нумерують наскрізно і дають їм назву «Таблиця», і назва розміщується зліва над таблицею (наприклад: Таблиця 2 – Початкові дані для розрахунків).

Формули та рівняння наводять безпосередньо після тексту, у якому вони згадуються, посередині рядка. Для набору формул у текстовому редакторі

Microsoft Word рекомендується використовувати засіб Microsoft Education з такими розмірами символів: звичайний – 14 пт, великий індекс – 10 пт, дрібний індекс – 7 пт, великий символ – 24 пт, дрібний символ – 12 пт (такі рекомендації стосуються розміру основного шрифту – 14 пт). Нумерація формул наскрізна, номер проставляється в круглих дужках з правого краю того самого рядка. Пояснення символів і числових коефіцієнтів формул слід наводити безпосередньо під формулою, у тій самій послідовності, у якій вони надані в формулі. Перший рядок пояснень починають без абзацу словом «де» без двокрапки. Пояснення кожного символу необхідно починати з нового рядка.

Захист контрольної роботи проводиться у термін, затверджений директором ІЕЕСУ, але не пізніше, ніж за тиждень до заліку. Без захисту контрольної роботи студент не допускається до іспиту.

Ускладнення, що виникають під час виконання контрольної роботи, усуваються під час індивідуально-консультативних занять, які проводить викладач. Графік індивідуально-консультативних занять складається на початку кожного семестру і знаходиться на кафедрі.

## **2 ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**

### **Завдання № 1 Розрахунок параметрів однофазного мостового випрямляча**

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

Схему силової частини однофазного мостового випрямляча наведено на рис. 1.1. Часові діаграми струмів і напруг на елементах такі самі, як і для однофазного випрямляча з нульовою точкою. Відмінність полягає лише в тому, що амплітуда зворотної напруги на вентилі в мостовому випрямлячі у 2 рази менша ніж у нульовому випрямлячі.

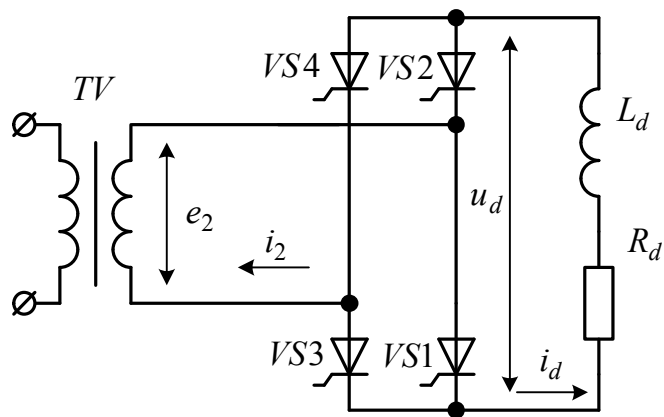


Рисунок 1.1 – Схема силової частини однофазного мостового випрямляча

*Робота з активним навантаженням ( $L_d = 0$ ).* Однофазна мостова схема складається з двообмоткового трансформатора і комплекту тиристорів VS1, VS2, VS3, VS4. Змінна напруга підводиться до однієї діагоналі моста, а навантаження підключається до іншої його діагоналі – між точкою з'єднання катодів двох тиристорів, що утворюють катодну групу тиристорів (VS1, VS3), і точкою з'єднання анодів двох тиристорів, що утворюють анодну групу тиристорів (VS2, VS4). Ключі пропускають струм попарно: VS1, VS4 і VS2, VS3. У схемі може пропускати струм і пара тиристорів, у якій анод тиристора катодної групи (VS1 або VS3) має найвищий потенціал, катод тиристора анодної групи (VS2 або VS4) – найнижчий потенціал. Наприклад, за позитивною півхвилею ЕРС  $E_2$  анод тиристора VS1 матиме найвищий потенціал, а катод VS4 – найнижчий потенціал, тобто в такому разі під час подачі від системи керування імпульсів, що відмикають, тиристори VS1 і VS4 пропускають струм (рис. 1.1). Протягом негативної півхвилі ЕРС  $E_2$  катод вентиля VS2 має найнижчий потенціал, а анод вентиля VS3 – найвищий потенціал, тому струм пропускають тиристори VS2 і VS3.

Часові діаграми струмів і напруг ідеальної ( $L_d = 0$  ;  $L_a = 0$ ) мостової схеми з активним навантаженням для довільного значення кута керування  $\alpha$ , зумовленого положенням імпульсів керування тиристорами VS1,4 і VS2,3 відносно ЕРС  $E_2$  вторинної обмотки трансформатора, зображені на рис. 1.2, а.



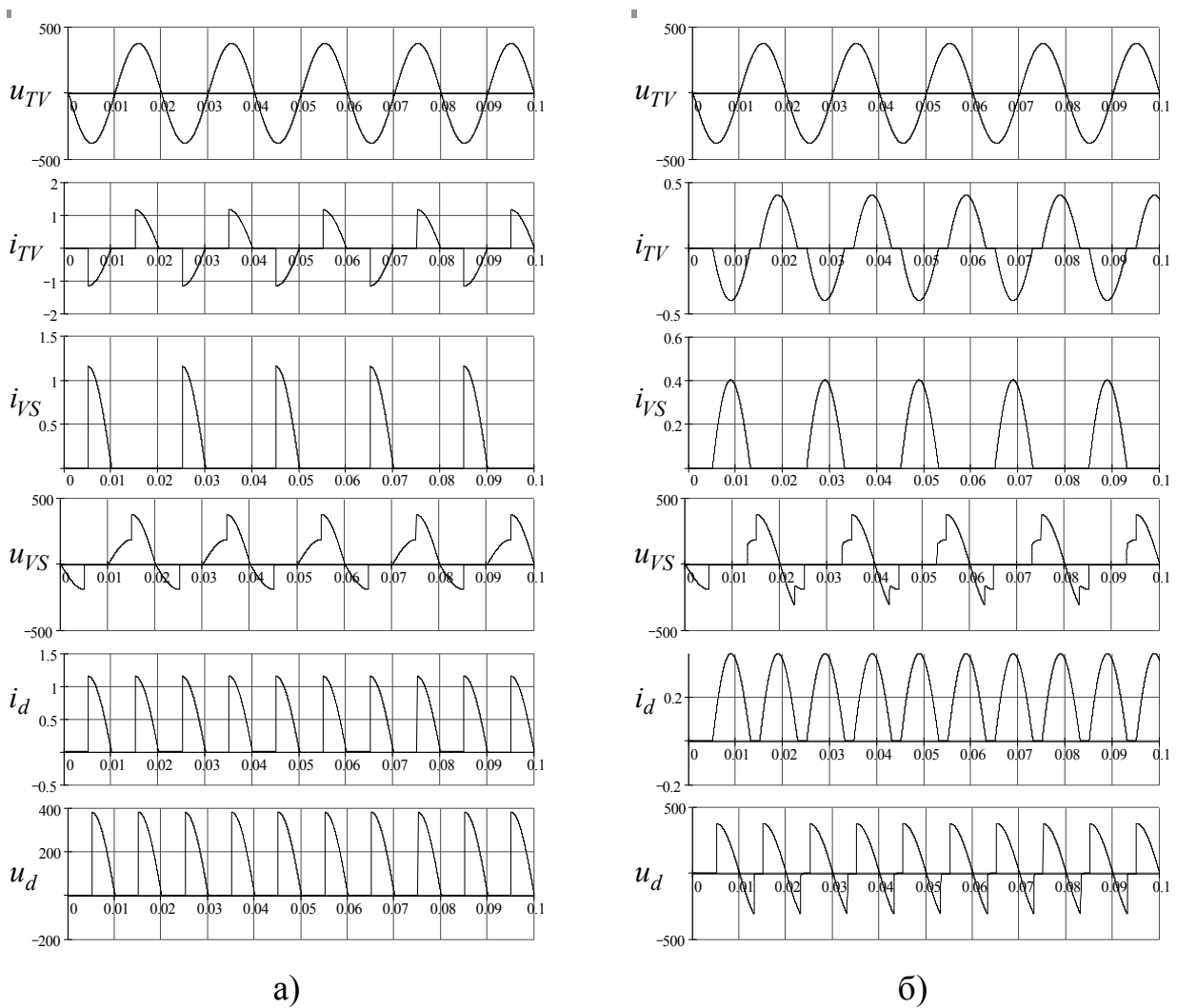


Рисунок 1.2 – Часові діаграми роботи однофазної мостової схеми випрямлення на активне (а) та активно-індуктивне навантаження (б)

*Робота з активно-індуктивним навантаженням.* Роботу схеми розглянемо за умови, що  $L_d = \infty$ , тобто струм у навантаженні не має пульсацій і перехід струму з однієї пари вентилів на другу відбувається миттєво. Амплітуда струму через вентиль дорівнює середньому значенню випрямленого струму, тобто  $I_{am} = I_d$ .

На відміну від режиму під час активного навантаження, тут крива випрямленої напруги на інтервалі  $\alpha$  має негативні значення (рис. 1.2, б). Це зумовлено тим, що енергія магнітного поля чи індуктивності навантаження підтримує струм у тиристорі та після переходу анодної ЕРС через нуль.

Максимальне значення зворотної напруги в однофазній мостовій схемі дорівнює амплітуді ЕРС вторинної обмотки трансформатора.

### Послідовність виконання завдання № 1

Завдання розрахунку схеми випрямлення може бути поставлене по-різному. Частіше доводиться розраховувати параметри ключів та трансформатора за відомими параметрами навантаження, іноді завдання ставляться навпаки. Розрахунки схеми виконуються за різними кутами керування, але якщо йдеться про випрямляч, який має працювати з нулевим кутом керування або з регулюванням кута у широкому діапазоні, тоді всі проектні розрахунки потрібно виконувати за умови  $\alpha = 0$ . У всіх випадках слід користуватися нижченаведеними співвідношеннями [1, 3–7].

*Розрахунок елементів однофазного мостового некерованого випрямляча для вибору елементів за каталожними даними.*

Середнє значення випрямленої напруги на навантаженні, В:

$$E_d = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi} = 0,9E_2.$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$k_{mp12} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Амплітуда зворотної напруги на тиристорі, В:

$$U_{зв.маx.} = \sqrt{2}E_2.$$

Постійна складова випрямленого струму навантаження, А:

$$I_d = \frac{E_d}{R_d}.$$

Середнє значення струму тиристора, А:

$$I_a = \frac{I_d}{2}.$$

Максимальне значення струму тиристора, А:

$$I_{маx vs} = \frac{\pi}{2}I_d.$$

Діюче значення струму тиристора, А:

$$I_{vs} = \frac{\pi}{4} I_d.$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А:

$$I_2 = 1,1 I_d.$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора, А:

$$I_1 = \frac{1,1 I_d}{K_{mp12}}.$$

Потужності первинної та вторинної обмоток трансформатора, Вт:

$$S_1 = S_2 = 1,1 E_d I_d = 1,1 P_d.$$

Згідно з проведеними розрахунками проводиться вибір елементів перетворювача (додаток А, табл. А.1, А.2).

*Розрахунок елементів однофазного мостового керованого випрямляча для вибору елементів за каталожними даними.*

Середнє значення випрямленої напруги, В:

$$E_{d\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 (1 + \cos\alpha),$$

де  $\alpha$  – кут керування тиристора.

Середнє значення випрямленого струму, А:

$$I_{d\alpha} = \frac{E_{d\alpha}}{R_d}.$$

Амплітуда прямої напруги на вентилі, В:

$$U_{np.max} = \sqrt{2} E_2 \sin\alpha.$$

Середнє значення струму вентиля, А:

$$I_a = \frac{I_{d\alpha}}{2}.$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А:

$$I_{2\alpha} = I_{d\alpha} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}.$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора,  $A$ :

$$I_{1\alpha} = k_{mp21} I_2.$$

де  $k_{mp21}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора  $k_{mp21} = \frac{E_1}{E_2}$ .

Коефіцієнт потужності першої гармоніки первинного струму розраховується за співвідношенням

$$\cos\varphi_{(1)} = \cos\frac{\alpha}{2}.$$

Діюче значення струму першої гармоніки у первинній обмотці трансформатора,  $A$ :

$$I_{1(1)} = \frac{2\sqrt{2} \cdot k_{mp21} I_d}{\pi} \cos\frac{\alpha}{2}.$$

Коефіцієнт спотворення струму:

$$\nu = 2\sqrt{2} \frac{\cos\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\pi(\pi-\alpha)}}.$$

Коефіцієнт потужності випрямляча:

$$\chi = 2\sqrt{2} \cos^2\frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi(\pi-\alpha)}}.$$

### **Завдання до теми**

1. Відповідно до варіанта завдання (табл. 1.1) розрахувати:
  - параметри однофазного мостового некерованого випрямляча;
  - параметри однофазного мостового керованого випрямляча.
2. За результатами розрахунків вибрати елементи випрямлячів.
3. Відповідно до варіанта завдання побудувати часові діаграми роботи розглянутих випрямлячів.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдання для розрахунку

<i>№ пор.</i>	$E_2, В$	$E_1, В$	$R_d,$ <i>Ом</i>	$\alpha,$ <i>град</i>	<i>№ пор.</i>	$E_2, В$	$E_1, В$	$R_d,$ <i>Ом</i>	$\alpha,$ <i>град</i>
1	110	220	10	15	16	150	220	20	75
2	110	220	12	30	17	100	220	25	30
3	110	220	15	45	18	80	380	10	35
4	110	220	17	60	19	140	220	5	45
5	110	220	20	90	20	160	220	15	80
6	110	220	13	15	21	110	380	10	85
7	110	220	18	30	22	110	220	15	15
8	110	220	14	45	23	140	380	10	30
9	110	220	16	60	24	150	220	5	25
10	110	220	19	90	25	200	220	10	30
11	110	220	10	15	26	150	220	20	45
12	110	220	20	30	27	100	220	5	60
13	110	220	5	45	28	12	380	15	30
14	110	220	15	60	29	17	220	25	15
15	110	220	25	90	30	10	220	20	75

### Контрольні питання

1. Яка відмінність робіт випрямлячів на активне та активно-індуктивне навантаження?
2. Надайте часові діаграми роботи однофазного мостового некерованого випрямляча під час роботи на активне навантаження.
3. Надайте часові діаграми роботи однофазного мостового некерованого випрямляча під час роботи на активно-індуктивне навантаження.
4. Надайте часові діаграми роботи однофазного мостового керованого випрямляча під час роботи на активне навантаження.
5. Надайте часові діаграми роботи однофазного мостового керованого випрямляча під час роботи на активно-індуктивне навантаження.

**Література:** [2, с. 36–78; 4, с. 98–103; 7, с. 201–203].

## **Завдання № 2 Розрахунок параметрів транзисторних перетворювачів постійного струму**

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

Для живлення споживачів електричної енергії, які потребують регулювання підведеної до них напруги, широкого розповсюдження набули транзисторні, або імпульсні, перетворювачі напруги. Вони перетворюють сталу за значенням постійну чи змінну напругу на регульовану величину способом періодичного підключення навантаження до джерела живлення. У цьому разі тривалість такого підключення можна змінювати, регулюючи таким чином середнє або діюче значення підведеної до навантаження напруги.

Перетворювачі, що дозволяють здійснювати широтно-імпульсне регулювання напруги на навантаженні, називають широтно-імпульсними перетворювачами (ШПІ).

Залежно від можливості зміни полярності напруги на навантаженні, ШПІ поділяються на:

- нереверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою і полярністю, але з різною тривалістю;
- реверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою, різною тривалістю і полярністю за один період.

Нереверсивні ШПІ можна розділити на дві групи: паралельні та послідовні. У послідовних імпульсних перетворювачах робочий транзисторний ключ вмикається послідовно з навантаженням. Характерною особливістю послідовних ШПІ є неможливість отримання напруги на їх виході вище напруги джерела живлення.

На рис. 2.1, а наведено схему нереверсивного перетворювача постійної напруги з послідовним увімкненням транзистора.

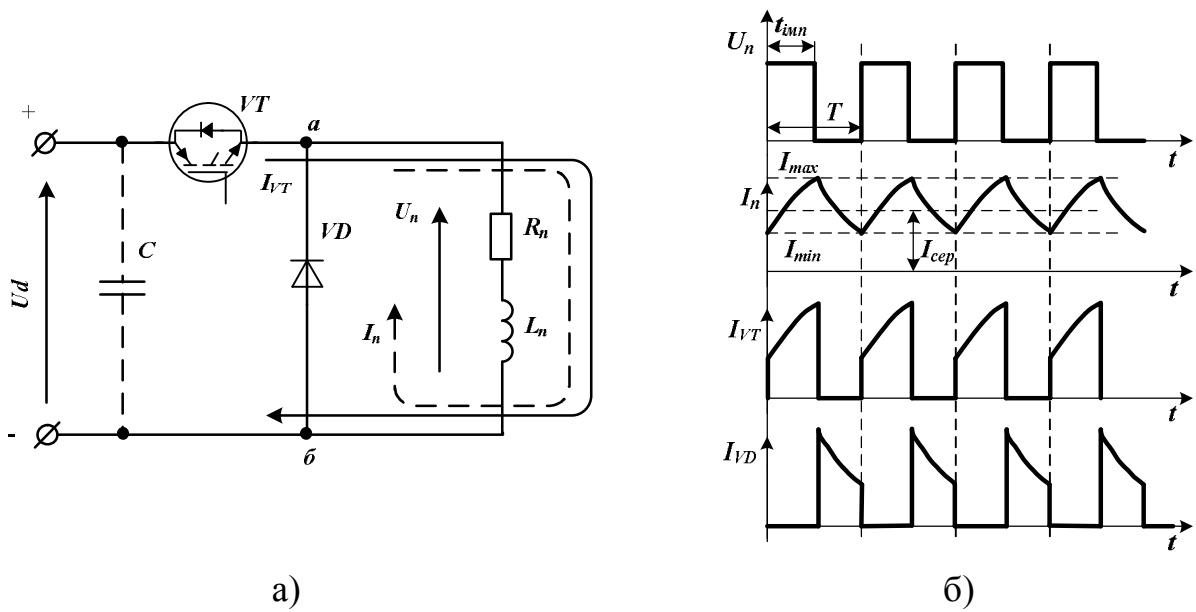


Рисунок 2.1 – Схема силової частини нереверсивного послідовного перетворювача (а) та його часові діаграми роботи (б)

Під час аналізу широтно-імпульсних перетворювачів прийнято припущення, що транзистори є ідеальними ключами із часом перемикання, значення якого наближається до нуля, внутрішній опір джерела живлення дорівнює нулю.

Часові діаграми роботи послідовного перетворювача на активно-індуктивне навантаження наведено на рис. 2.1, б. Якщо транзистор  $VT$  відкритий, енергія споживається від джерела живлення (напрямок струму зображений суцільною лінією). У разі замикання транзистора струм навантаження завдяки ЕРС самоіндукції зберігає свій напрямок, замикаючись через зворотний діод  $VD$  (напрямок струму показано штриховою лінією).

Нереверсивні широтно-імпульсні перетворювачі з послідовним увімкненням транзисторного ключа набули широкого розповсюдження для живлення якорних кіл двигунів постійного струму, оскільки вони забезпечують їх роботу у двигунному режимі.

Реверсивні перетворювачі постійної напруги (рис. 2.2, а) надають можливість здійснювати безконтактне плавне регулювання та реверсування струму в споживачах постійного струму. Для реверсивних (мостових)

перетворювачів широко застосовують три способи керування ключами: симетричний, несиметричний, почерговий. На практиці також можуть застосовуватися деякі модифікації зазначених законів керування. Але в будь-якому з перелічених методів керування можна виділити дві основні фази роботи – це період корисної роботи та період неробочого ходу.

Період виконання корисної роботи, тобто ввімкненого стану перетворювача, за всіх законів керування виглядає майже однаково і полягає у тому, що один із транзисторів верхнього плеча одного напівмоста та протилежний йому (по діагоналі) транзистор нижнього плеча іншого напівмоста відкриваються, і так через навантаження починає протікати струм.

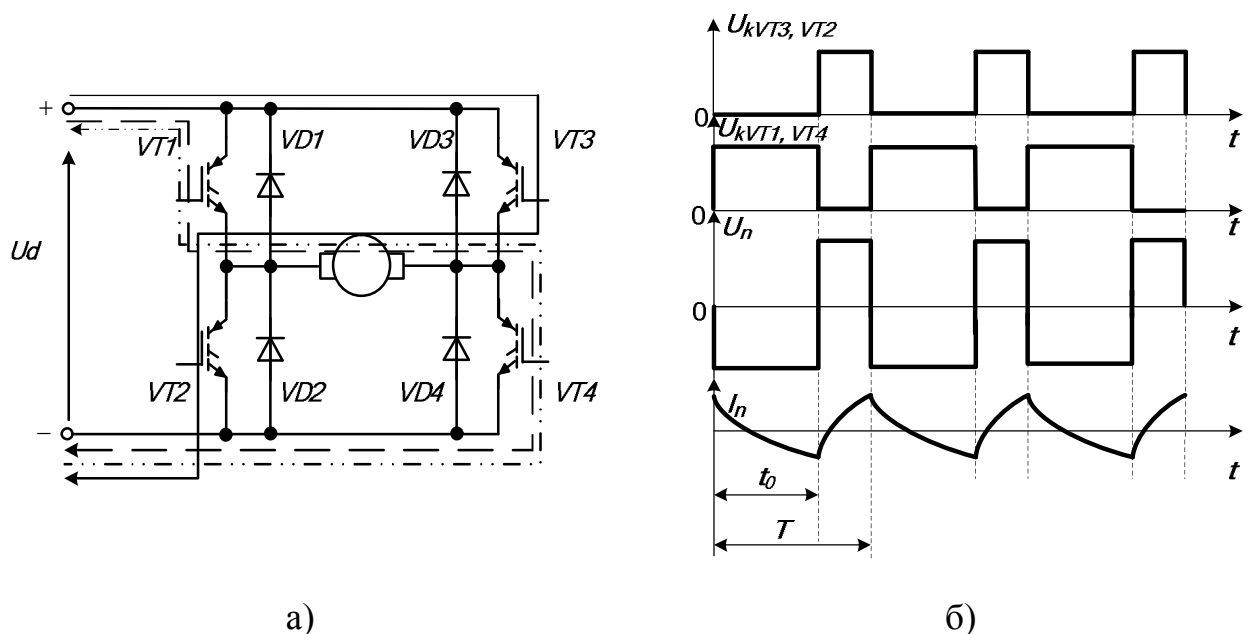


Рисунок 2.2 – Схема силової частини реверсивного перетворювача (а) та часові діаграми його роботи (б) за симетричного керування

Одним з найбільш розповсюджених методів керування мостовим ШПІ є симетричний метод керування, чи «фіксована протифаза» (Lock anti-phase drive). Його основною перевагою є те, що він дозволяє майже повністю виключити протікання струму через зворотні діоди, що позитивно відображається на теплових утратах схеми. Принцип роботи перетворювача із симетричним керуванням базується на підключенні навантаження під час



неробочого ходу до напруги протилежної полярності. Тобто якщо у час  $t = t_{имп}$  відкриті транзистори  $VT2$  та  $VT3$ , то у момент неробочого ходу  $t = t_0$  відкриваються транзистори  $VT1$  і  $VT4$  (рис. 5.2, а).

Отже, напруга на навантаженні має форму послідовних двополярних імпульсів (рис 2.2, б), тоді як струм діодів майже завжди залишається таким, що дорівнює нулю (окрім короткого проміжку часу під час перемикання транзисторів). Змінюючи тривалість позитивних і негативних імпульсів, можна регулювати значення і полярність напруги на навантаженні.

Недоліком симетричного способу керування є зміна знаку миттєвих значень вихідної напруги, що призводить до зміни напрямку протікання струму і, як наслідок, виникнення моменту двигуна, протилежного основному. Також значним недоліком є істотні пульсації напруги на навантаженні, що потребує досить великої індуктивності згладжувального дроселя. Тому такий спосіб керування застосовується в перетворювачах невеликої потужності.

Імпульсні перетворювачі набули широкого застосування для завдвнь регулювання та стабілізації напруги різних споживачів. ШПП найбільшою мірою задовольняють основні вимоги, які висувають до напівпровідникових перетворювачів систем електропривода: високий ККД унаслідок незначних втрат потужності на елементі керування перетворювача; практична відсутність зони переривчастих струмів в електроприводі постійного струму на базі ШПП; достатня перевантажувальна здатність для забезпечення форсування в перехідних режимах роботи електропривода; одержання жорстких статичних і динамічних характеристик електропривода в цілому; мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки керувальним чинником є час провідності ключа, а не величина внутрішнього опору елемента керування, що існує у разі безперервного регулювання; малі габарити та маса.

## **Послідовність виконання завдання № 2**

Розрахунок широтно-імпульсного перетворювача виконується відповідно до послідовності за наведеними нижче співвідношеннями [10, 11].

Розрахунок параметрів нереверсивного послідовного транзисторного перетворювача постійного струму.

Середнє значення випрямленої напруги визначається залежно від напруги навантаження та поточного коефіцієнта заповнення імпульсів:

$$U_n = U_d \gamma,$$

де  $\gamma = \frac{t_{imn}}{T}$  – коефіцієнт заповнення імпульсів ( $t_{imn}$  – час увімкненого стану ключа;  $T$  – період слідування імпульсів).

Максимальне та мінімальне значення струму навантаження (струму через робочий транзистор і зворотний діод) визначаються відповідно до співвідношення:

$$I_{\max} = \frac{U_n}{r_n} \frac{1-b_1^{-1}}{1-a_1};$$

$$I_{\min} = \frac{U_n}{r_n} \frac{(b_1-1)a_1}{1-a_1},$$

де  $a_1 = e^{-\frac{T}{T_n}}$ ;  $b_1 = e^{\frac{\gamma T}{T_n}}$  – коефіцієнти, що залежать від навантаження та параметрів режиму перетворювача ( $T_n = \frac{l_n}{r_n}$  – постійна часу кола навантаження).

Середнє значення струму робочого транзистора дорівнює:

$$I_{cpVT} = \frac{U_n}{r_n} \left[ \gamma - \frac{T_n}{T} \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1 b_1)}{1-a_1} \right].$$

Середнє значення струму зворотного діода:

$$I_{cpVD} = \frac{U_n}{r_n} \frac{T_n}{T} \left[ \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1 b_1)}{1-a_1} \right].$$

Середнє значення струму навантаження:

$$I_n = I_{cpVT} + I_{cpVD}.$$

Амплітуда пульсацій струму в навантаженні:

$$\Delta I_{\max} = \frac{U_n}{r_n} \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1 b_1)}{1-a_1}.$$

Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги:

$$k_n = \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1b_1)}{1-a_1}.$$

*Розрахунок параметрів реверсивного транзисторного перетворювача постійного струму із симетричним законом керування.*

Середнє значення випрямленої напруги визначається залежно від напруги навантаження та поточного коефіцієнта заповнення імпульсів:

$$U_n = U_d(2\gamma - 1).$$

Максимальне та мінімальне значення струму навантаження (струму через робочий транзистор і зворотний діод) визначаються відповідно до співвідношення:

$$I_{\max} = \frac{U_n}{r_n} \frac{1+a_1-2b_1^{-1}}{1-a_1};$$
$$I_{\min} = -\frac{U_n}{r_n} \frac{1+a_1-2a_1b_1}{1-a_1}.$$

Середнє значення струму робочого транзистора дорівнює:

$$I_{cpVT} = \frac{U_n}{r_n} \left[ \gamma - 2 \frac{T_n}{T} \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1b_1)}{1-a_1} \right].$$

Середнє значення струму зворотного діода:

$$I_{cpVD} = 2 \frac{U_n}{r_n} \frac{T_n}{T} \left[ \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1b_1)}{1-a_1} \right] - \frac{U_n}{r_n} (1-\gamma).$$

Середнє значення струму навантаження:

$$I_n = \frac{U_d}{r_n} (2\gamma - 1).$$

Амплітуда пульсацій струму в навантаженні:

$$\Delta I_{\max} = 2 \frac{U_n}{r_n} \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1b_1)}{1-a_1}.$$

Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги:

$$k_n = 2 \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1b_1)}{1-a_1}.$$

### Завдання до теми

1. Відповідно до варіанта завдання (табл. 2.1) розрахувати:

– параметри нереверсивного транзисторного перетворювача;

– параметри реверсивного транзисторного перетворювача.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдання для розрахунку

<i>№ пор.</i>	$U_d$ , В	$r_n$ , Ом	$l_n$ , Гн	$T$ , с	$t_{имн}$ , с
1	100	5	0,0015	0,001	0,0004
2	100	10	0,002	0,001	0,0005
3	100	15	0,0025	0,001	0,0007
4	100	20	0,003	0,001	0,0008
5	100	25	0,0035	0,001	0,0009
6	150	5	0,004	0,002	0,0008
7	150	10	0,0045	0,002	0,001
8	150	15	0,005	0,002	0,0012
9	150	20	0,0055	0,002	0,0015
10	150	25	0,006	0,002	0,0018
11	200	5	0,0015	0,0005	0,0002
12	200	10	0,002	0,0005	0,0003
13	200	15	0,0025	0,0005	0,0004
14	200	20	0,003	0,0005	0,00045
15	200	25	0,0035	0,0005	0,00035
16	250	5	0,004	0,001	0,0004
17	250	10	0,0045	0,001	0,0005
18	250	15	0,005	0,001	0,0007
19	250	20	0,0055	0,001	0,0008
20	250	25	0,006	0,001	0,0009
21	50	5	0,0015	0,002	0,0008
22	50	10	0,002	0,002	0,001
23	50	15	0,0025	0,002	0,0012
24	50	20	0,003	0,002	0,0015
25	50	25	0,0035	0,002	0,0018
26	125	5	0,004	0,0005	0,0002
27	125	10	0,0045	0,0005	0,0003
28	125	15	0,005	0,0005	0,0004
29	125	20	0,0055	0,0005	0,00045
30	125	25	0,006	0,0005	0,00035

2. За результатами розрахунків вибрати елементи перетворювачів.
3. Відповідно до варіанта завдання побудувати часові діаграми роботи розглянутих транзисторних перетворювачів.

### **Контрольні питання**

1. Надайте класифікацію транзисторних перетворювачів постійного струму.
2. Поясніть принцип роботи послідовного транзисторного перетворювача під час роботи на активне навантаження.
3. Поясніть принцип роботи послідовного транзисторного перетворювача під час роботи на активно-індуктивне навантаження.
4. Надайте характеристику методів керування реверсивними транзисторними перетворювачами.
5. Поясніть принцип роботи реверсивного транзисторного перетворювача з симетричним законом керування під час роботи на активне навантаження.
5. Поясніть принцип роботи реверсивного транзисторного перетворювача із симетричним законом керування під час роботи на активно-індуктивне навантаження.

**Література:** [8, с. 121–130; 9, с. 245–280; 10, с. 300–325].

### **Завдання № 3 Розрахунок параметрів перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму**

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

У електроприводах змінного струму для задач керування асинхронними та синхронними двигунами широкого поширення набули перетворювачі частоти. Електроприводи із частотним керуванням за своїми регульовальними властивостями не поступаються електроприводам постійного струму, а за економічними та малогабаритними показниками здебільшого переважають їх.

На сьогодні більше широкого поширені перетворювачі частоти з ланкою постійного струму. На вході енергетичного каналу цих перетворювачів може бути встановлений керований або некерований випрямляч. Після перетворення випрямлячем енергії змінного струму з постійними значеннями напруги і частоти

на енергію постійного струму вона надходить на вхід інвертора і знову перетворюється на енергію трифазного змінного струму, але вже з регульованими параметрами. Отже, у перетворювачах частоти такого типу відбувається подвійне перетворення енергії, що дещо знижує його ККД, однак інші істотні переваги цих перетворювачів забезпечують їм домінуюче положення в сучасному автоматизованому електроприводі.

Для енергетичної розв'язки випрямляча та інвертора між ними встановлюють накопичувач енергії. Залежно від виду цього накопичувача – конденсатор чи індуктивність – інвертор працює або в режимі джерела напруги, або джерела струму.

Широкий клас перетворювачів частоти з ланкою постійного струму складають перетворювачі, у яких функції регулювання обох вихідних параметрів (амплітуди і частоти) покладені на інвертор, а у випрямлячі використовуються некеровані діоди (рис. 3.1). Такий тип перетворювачів належить до широтно-імпульсних перетворювачів, а інвертор, що працює в режимі широтно-імпульсної модуляції, – до широтно-імпульсних регуляторів.

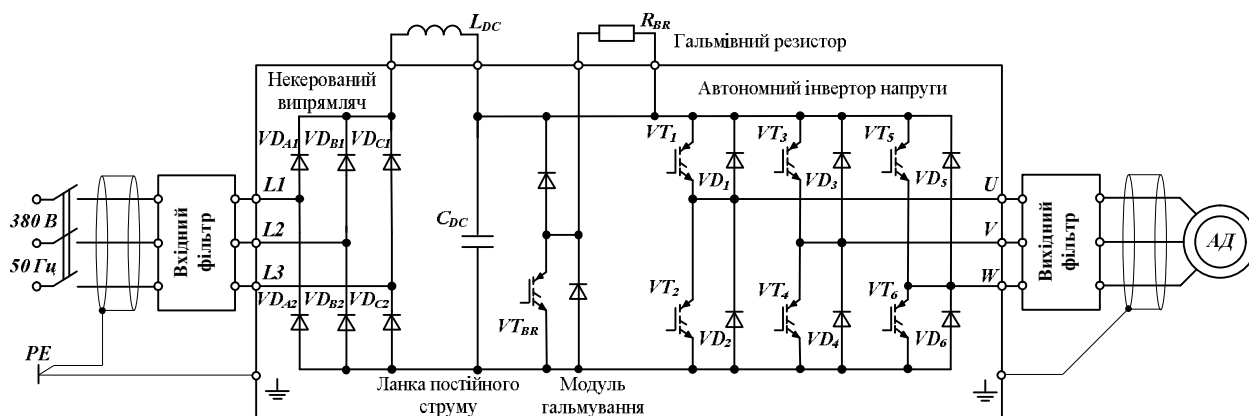


Рисунок 3.1 – Схема силової частини регульованого електропривода з перетворювачем частоти

На сьогодні відома велика кількість різних способів керування силовими ключами інвертора. Найпростішим є спосіб, у якому кутова тривалість замкнутого стану ключів (відкритого стану транзисторів, що працюють у ключовому режимі) дорівнює  $\pi$  ( $\alpha = 180^\circ$ ) (рис. 3.2).

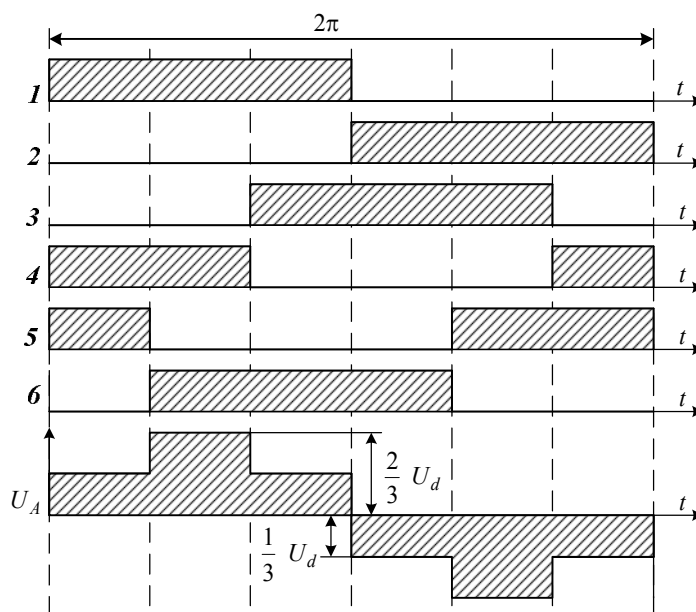


Рисунок 3.2 – Алгоритм керування АІН, якщо  $\alpha = 180^\circ$

У цьому випадку в кожен момент часу замкнуті три ключі. Стан ключів змінюється через кожну шосту частину періоду, тривалість якої в одиницях часу  $\Delta t$  визначається заданим значенням частоти на виході інвертора як  $\Delta t = \frac{\pi}{3}$ . Отже, зміна сигналу задання частоти на вході системи керування інвертором призводить до зміни цієї тривалості. Послідовність замикання ключів 1–2–3–4–5–6 (рис. 3.2) відповідає певному напрямку обертання двигуна. Для його зміни ця послідовність має бути змінена на зворотну.

З діаграми очевидно, що існує шість ненульових станів ключів, за яких завжди замкнені два парні та один непарний або один парний і два непарні транзисторні ключі. Окрім них, можуть і ще використовуватися два нульові стани, за яких замкнуті ключі 1–3–5 або 2–4–6 і всі три фази статора будуть замкнені на позитивний або негативний вихід випрямляча, що відповідає нулю напруги на навантаженні. Послідовність керування транзисторними ключами така: 123, 234, 345, 456, 561, 612.

Несинусоїдність вихідної напруги перетворювача призводить до несинусоїдності струму у статорних обмотках і пульсації моменту двигуна. Ці пульсації значною мірою проявляються у разі зниженої частоти та невеликого

моменту інерції механізму і викликають нерівномірність обертання двигуна, а іноді й виникнення крокового режиму, коли двигун обертається із зупинками. Отже, несинусоїдна напруги на виході випрямляча накладає обмеження на можливий діапазон регулювання швидкості електропривода.

Для покращення гармонічного складу вихідної напруги інвертора використовують ШІМ на несучій частоті, коли модульованим сигналом є синусоїдні чи трапецеїдальні напруги. На рис. 3.3 наведено приклад формування синусоїдної ШІМ на несучій частоті в автономних інверторах.

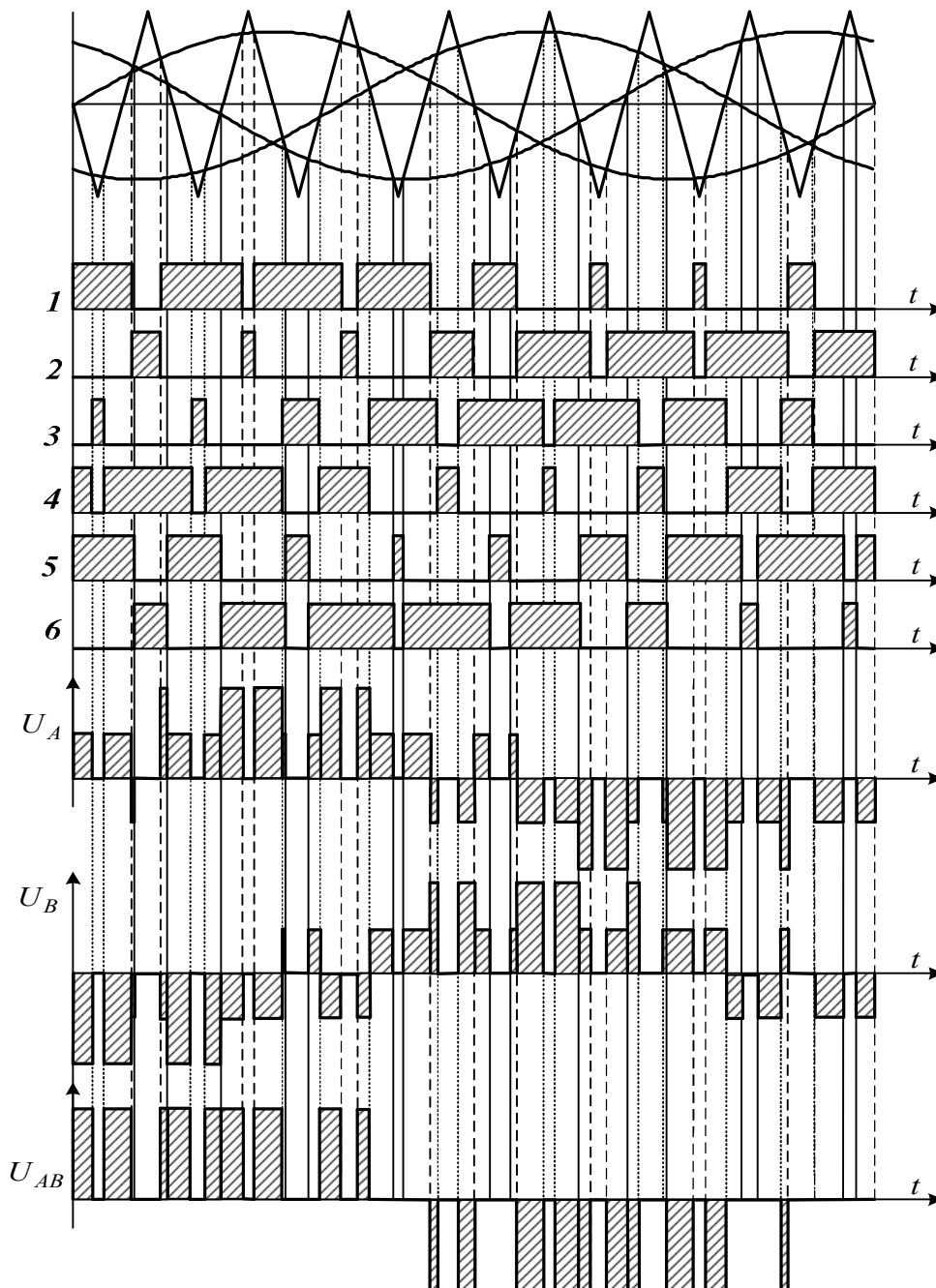


Рисунок 3.3 – Формування синусоїдної ШІМ на несучій частоті



Модульовані напруги керування транзисторами кожного плеча інвертора зсунуті на  $120^\circ$ . Ці сигнали порівнюються з пилкоподібним несучим сигналом і формують сигнали керування. Відповідно до сигналів керування транзисторами формується напруга на кожній фазі навантаження (рис. 3.3).

### Послідовність виконання завдання № 3

Розрахунок параметрів перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму виконується відповідно до такої послідовності за наведеними нижче співвідношеннями [10, 11].

*Розрахунок параметрів автономного інвертора напруги.*

Автономний інвертор напруги складається з власне АІН і фільтра, найпростішим варіантом якого може бути конденсатор, підключений паралельно до входу інвертора. Розрахунок автономного інвертора напруги проводиться у такій послідовності.

Активна потужність на вході перетворювача, Вт:

$$P_a = \frac{P_n}{\eta},$$

де  $P_n$  – номінальна напруга двигуна;  $\eta$  – номінальний ККД двигуна.

Напруга на вході автономного інвертора, В:

$$U_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} U_n \text{ (В)},$$

де  $U_n$  – лінійна напруга двигуна ( $U_n = \sqrt{3} U_{fn}$ ).

Струм у ланці постійного струму, А:

$$I_d = \frac{P_a}{U_d}.$$

Струм фаз статора асинхронного двигуна, А:

$$I_n = \frac{P_n}{3U_n \eta \cos \varphi}.$$

Максимальний пусковий струм асинхронного двигуна, А:

$$I_{\max} = 5I_n.$$

Максимальне значення струму транзисторів автономного інвертора, А:

$$I_{VT \max} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\max}.$$

За розрахованими параметрами проводиться вибір силових транзисторних ключів автономного інвертора напруги (Додаток А).

*Розрахунок параметрів некерованого випрямляча.*

Для живлення автономних інверторів струму у складі ПЧ використовують випрямлячі змінної напруги. Найбільш раціональним варіантом у цьому випадку є випрямляч, зібраний за трифазною мостовою схемою. Розрахунок параметрів трифазного мостового некерованого випрямляча проводиться у такій послідовності.

Середнє значення напруги на виході випрямляча, В:

$$U_{dVD} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_n.$$

Амплітуда зворотної напруги на діодах, В:

$$U_{z6 \max} = \sqrt{6} U_n.$$

Середній струм на діодах випрямляча, А:

$$I_{cp} = \frac{1}{3} I_d.$$

Діюче значення струму діодів випрямляча, А:

$$I_{VD} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d.$$

Максимальне значення струму випрямляча, А:

$$I_{\max} = I_d.$$

За розрахованими параметрами проводиться вибір силових діодів некерованого трифазного випрямляча (додаток А).

*Розрахунок параметрів вихідного фільтра автономного інвертора.*

Для обмеження перенапруг на затискачах приводного двигуна і захисту ізоляції його обмоток від пробоя, якщо довжина силового кабелю перевищує 10–15 м у безпосередній близькості від двигуна, рекомендується підключати вихідний фільтр, який містить ємність і дросель. Основною вимогою до фільтра

є забезпечення заданого коефіцієнта гармонік змінної напруги в стаціонарному режимі.

Індуктивність вихідного фільтра, мГн:

$$L_1 \geq \frac{0,25U_{\max}}{(0,4-0,6)f_k I_n},$$

де  $U_{\max}$  – максимальна напруга ланки постійного струму ( $U_{\max} = 1,1U_{dVD}$ );  
 $f_k$  – несуча частота ШІМ.

Ємність вихідного фільтра, мкФ:

$$C_1 = \frac{T_k^2}{64k_g L_1},$$

де  $T_k$  – період несучої частоти ШІМ ( $T_k = 1/f_k$ ), с;  $k_g$  – коефіцієнт вищих гармонік ( $k_g = 0,05$ ).

Дроселі включають у кожен фазу, послідовно з асинхронним двигуном, а конденсатори з'єднують у трикутник і включають паралельно двигуну. Відповідно конденсатори суттєво не впливають на загальний опір статорної ланцюга, тому опором фільтра під час розрахунків можна знехтувати.

*Розрахунок параметрів фільтра ланки постійного струму.*

Індуктивність у колі постійного струму перетворювача згладжує пульсації випрямленого струму, зменшує зону переривчастих струмів і обмежує швидкість наростання аварійного струму через тиристри у разі короткого замикання на стороні випрямленого струму. Конденсатор призначений для замикання реактивної складової струму статора.

Якість фільтра визначається коефіцієнтом згладжування:

$$S_{LC} = \frac{q_{in}}{q_{out}},$$

де  $q_{in}$  – коефіцієнт пульсацій на вході фільтра;  $q_{out}$  – коефіцієнт пульсацій на виході фільтра, приймається в межах 0,01..0,1.

Коефіцієнт пульсацій на вході фільтра визначається за виразом:

$$q_{in} = \frac{2}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

де  $m$  – кількість пульсацій випрямленої напруги за період (для трифазної мостової схеми випрямлення  $m=6$ );  $\alpha$  – кут керування силовими ключами випрямляча ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Ємність конденсатора фільтра в ланці постійного струму приймається з розрахунку 100 мкФ на 1 кВт потужності двигуна, мкФ:

$$C_2 = 100P_n.$$

Індуктивність фільтра в ланці постійного струму, мГн:

$$L_2 = \frac{S_{LC} + 1}{m^2 \omega_2 C_2},$$

де  $\omega$  – частота напруги мережі живлення ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50$  Гц).

### Завдання до теми

1. Відповідно до варіанта завдання (табл. 3.1) провести розрахунки параметрів перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдання для розрахунку

№ пор.	$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$\eta$	$\cos\varphi$	$f_k$ , кГц
1	220	0,25	0,8	0,75	1
2	220	0,5	0,7	0,8	1
3	220	0,75	0,6	0,85	1
4	220	1	0,85	0,75	1
5	220	1,5	0,85	0,9	1
6	220	2	0,7	0,85	2
7	220	2,2	0,6	0,81	2
8	220	3	0,87	0,9	2
9	220	3,5	0,86	0,7	2
10	220	5,5	0,78	0,8	2
11	220	0,25	0,85	0,9	3
12	220	0,5	0,7	0,85	3
13	220	0,75	0,6	0,81	3
14	220	1	0,87	0,9	3
15	220	1,5	0,86	0,7	3
16	220	2	0,78	0,8	4
17	220	2,2	0,8	0,75	4

Продовження таблиці 3.1

№ пор.	$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$\eta$	$\cos\varphi$	$f_k$ , кГц
18	220	3	0,7	0,8	4
19	220	3,5	0,6	0,85	4
20	220	5,5	0,85	0,75	5
21	220	0,25	0,85	0,9	5
22	220	0,5	0,6	0,85	5
23	220	0,75	0,85	0,75	5
24	220	1	0,85	0,9	5
25	220	1,5	0,7	0,85	5
26	220	2	0,6	0,81	8
27	220	2,2	0,6	0,85	8
28	220	3	0,85	0,75	8
29	220	3,5	0,85	0,9	8
30	220	5,5	0,7	0,85	8

2. За результатами розрахунків вибрати елементи перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

3. Відповідно до варіанта завдання побудувати часові діаграми роботи перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

### Контрольні питання

1. Перелічіть вимоги до перетворювачів частоти.
2. Надайте класифікацію перетворювачів частоти.
3. Надайте загальну характеристику перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму.
4. Поясніть різницю між перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму, у яких використовуються керовані та некеровані випрямлячі.
5. Охарактеризуйте переваги та недоліки перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму.
6. Як формуються сигнали напруги трифазного автономного інвертора напруги із законом керування з  $\alpha = 180$  град.?
7. Надайте характеристику керування автономним інвертором напруги із ШПР на основній частоті.
8. Поясніть принципи формування синусоїдної ШІМ на несучій частоті.

**Література:** [8, с. 301–318; 9, с. 350–381; 11, с. 498–513].

### 3 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Вид контролю	Максимальна сума балів
Наповнюваність змісту	20
Якість оформлення	5
Своєчасність виконання	5
Захист роботи	20
<b>Всього</b>	<b>50</b>

#### Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		Для іспиту, курсового проекту (роботи), практики	Для заліку
90–100	A	Відмінно	Зараховано
82–89	B	Добре	
74–81	C		
64–73	D	Задовільно	
60–63	E		
35–59	FX	Незадовільно з можливістю повторного складання	Не зараховано з можливістю повторного складання
0–34	F	Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням навчальної дисципліни	Не зараховано з обов'язковим повторним вивченням навчальної дисципліни

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### Основна

1. Руденко В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 400 с.
2. Розанов Ю. К. Основи силової перетворювальної техніки / Ю. К. Розанов. – М. : Энергия, 1979. – 392 с.
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники : учебник / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. – Ч. 1. – 199 с.
4. Справочник по автоматизированному электроприводу ; под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
5. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы : справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 401 с.
6. Лалетин В. И. Проектирование тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока : учебное пособие / В. И. Лалетин. – Киров : Изд-во ВятГУ, 2006. – 131 с.

### Додаткова

7. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике / И. М. Чиженко. – К. : Техніка, 1978. – 447 с.
8. Попович М. Г. Електромеханічні системи керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
9. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН–ПРЕСС, 2008. – 416 с.
10. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М. : Издательский дом Додэка–XXI, 2005. – 384 с.
11. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.

## Параметри напівпровідникових ключів

Таблиця А.1 – Параметри випрямних діодів

Тип діода	$U_{зв\ max}$ , В	$I_{np\ max}$ , А	$f_{max}$ , кГц	$U_{np}$ , В	$I_{зв}$ , мкА
Д243	200	10 А	1,1	1,25(10 А)	3000 (200)
Д243Б	200	5 А	1,1	1,5(5 А)	3000 (200)
КД243Г	400	6 А	1	1,1 (1 А)	10 (400)
КД243Е	800	6 А	1	1,1 (1 А)	10 (800)
КД244В	200	10 А	200	1,3 (10 А)	100 (100)
Д245	300	10 А	1,1	1,25 (10 А)	3000 (300)
Д246	400	10 А	1,1	1,25 (10 А)	3000 (400)
КД257Б	400	15 А	–	1,5 (5 А)	2 (400)
Д1004	2 кВ	100 А	1	5 (100)	100 (2 кВ)
Д1005А	4 кВ	50 А	1	5 (50)	100 (4 кВ)
Д1005Б	4 кВ	100 А	1	10 (100)	100 (4 кВ)
д1011	500	300 А	1	1,5 (300)	100 (500)
КДС111А	300	200 А	20	1,2 (100)	3 (300)
КДС111Б	300	200 А	20	1,2 (100)	3 (300)
КД270Д	150	7,5 А	–	0,9 (7,5 А)	1 мА
КД270Е	200	7,5 А	–	0,9 (7,5 А)	2 мА
КД271Г	100	10 А	–	0,85 (10 А)	1 мА
КД272Е	200	15 А	–	0,9 (15 А)	2 мА
КД272И	300	15 А	–	0,95 (15 А)	5 мА
КД272К	350	15 А	–	1 (15 А)	5 мА
КД272Л	400	15 А	–	1,1 (15 А)	5 мА
КД273И	300	20 А	–	0,95 (20 А)	5 мА
КД273К	350	20 А	–	1 (20 А)	5 мА
КД273Л	400	20 А	–	1,1 (20 А)	5 мА
Д209	400	400	1	1 (100)	50 (400)
КД209А	400	700	1	1 (700)	100 (400)
КД209Б	600	500	1	1 (500)	100 (600)
КД209В	800	500	1	1 (500)	100 (800)
КД209А-1	400	700	1	30 (400 В)	–
КД209Б-1	600	700	1	30 (600 В)	–
КД209В-1	800	500	1	30 (800 В)	–
КД209Г-1	1000	200	1	50 (1000 В)	–
Д210	500	400	1	1 (100)	50 (500)
МД218А	1200	100	1	1,1 (100)	50(1200)
КД221П	600	300	1	1,4(0,3 А)	100 (600 В)
КД221Е1	400	300	1	1,4 (0,3 А)	100 (400 В)



Таблиця А.2 – Параметри силових тиристорів

Тип тиристора	$I_{np \max}$ , А	$U_{зв \max}$ , В	$I_{кер}$ , мА	
			ввімкнення	утримання
25TTS12	16	1200	45	
40TPS08	35	800	150	
40TPS12	35	1200	150	
BCR16CM	16	600	30	
BT 151 650R	12	650		
BT 151 800R	12	800	40	20
BT 169D	12	400	6	5
BTA 16 600B	16	600	50	25
BTA 26 600A	25	600	150	100
BTA 26 600B	25	600	100	80
BTB 16 600B	16	600	100	50
BTB 24 600B	25	600	100	50
ESM 740	10	300	50	
IRKT105/10	105	1000		
IRKT105/12	105	1200		
IRKT162/12	160	1200		
IRKT162/16	160	1600		
IRKT41/12	45	1200		
IRKT56/10	60	1000		
IRKT56/12	60	1200		
IRKT71/10	65	1000		
IRKT91/10	95	1000		
IRKT91/12	95	1200		
MAC12M	12	600	35	40
MAC15M	15	600	35	40
MAC15N	15	800	35	40
MAC320A8FP	20	600	75	
MAC8SN	25	600		
MAC9M	8	600	50	
MAC9N	8	800	50	
MCR12N	12	800	20	
MCR25M	25	600	30	
MCR8N	8	800	15	
TM100SZ	100	400		
TYN 408	8	400	15	30

Таблиця А.3 – Параметри IGBT транзисторів

Тип транзистора	$U_{ce\max}$ , В	$R_{ce}$ , мОм	$I_c$ , А; $T_c = 25/100^\circ\text{C}$	$Q_g / Q_{ge}$ , нК	$P_D$ , Вт;
IRFB23N20D	200	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRFB4020PBF	200	-/-/100,0	18/13	18,0/5,3	100/-
IRFS23N20D	400	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRFSL23N20D	400	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRF640N	400	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRF640NL	200	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRF640NS	200	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRFB4103	200	-/-/165,0	17/12	25,0/12,0	140/-
IRFR15N20D	350	-/-/165,0	17/12	27,0/14,0	140/-
IRFU15N20D	200	-/-/165,0	17/12	27,0/14,0	140/-
IRF7450	200	-/-/170,0	-/-	26,0/12,0	-/3
IRFR13N20D	350	-/-/235,0	14/9,5	25,0/12,0	110/-
IRFU13N20D	200	-/-/235,0	14/9,5	25,0/12,0	110/-
IRF630N	350	-/-/300,0	9,5/6,8	23,3/11,3	82/-
IRFU9N20D	400	-/-/380,0	9,4/6,7	18,0/9,0	86/-
IRFR220N	200	-/-/600,0	5/3,5	15,0/6,1	43/-
IRFU220N	350	-/-/600,0	5/3,5	15,0/6,1	43/-
IRF7464	200	-/-/730,0	-/-	9,5/4,6	-/2,5
IRF6641	200	-/-/-	-/-	34,0/9,5	89/2,8
IRFB4233PBF	230	-/-/37,0	56/39	120/44	370/-
IRFB4332PBF	250	-/-/33,0	60/42	99/35	390/-
IRFP4332PBF	250	-/-/33,0	57/40	99/35	360/-
IRFP4232	250	-/-/35,7	60/42	160/60	430/-
IRFB4229PBF	250	-/-/46,0	46/33	72/26	330/-
IRFI4229PBF	250	-/-/46,0	19/12	73/24	46/-
IRFP4229PBF	250	-/-/46,0	44/31	72/26	310/-
IRFS4229PBF	250	-/-/48,0	45/32	72/26	330/-
IRF7453	250	-/-/230,0	-/-	25,0/11,0	-/2,5
IRFR12N25D	250	-/-/260,0	14/10	23/12	144/-
IRFU12N25D	250	-/-/260,0	14/10	23/12	144/-
IRFP4242PBF	300	-/-/59,0	46/33	165/61	430/-
IRF3000	300	-/-/400,0	-/-	22,0/11,0	-/2,5
RFL4315	150	-/-/185,0	-/-	12,0/6,8	-/2,8
IRF7465	150	-/-/280,0	-/-	10,0/5,0	-/2,5
IRF5802	150	-/1200,0	-/-	4,5/2,4	2/2
IRFI4227PBF	200	-/-/22,0	26/17	73,0/21,0	18/-
IRFBA90N20D	200	-/-/23,0	98/71	160,0/75,0	650/-

Таблиця А.4 – Параметри діодів Шотки

Тип діода	$U_R$ , В	$I_{AV}$ , А	$I_{FSM}$ , А	$T_{jmax}$ , °С	$C_D$ , пФ
STPS3045DJF	45	30	200	150	1200
STPS30100ST	100	30	300	150	1300
STPS30M100ST/SFP/SR	100	30	300	150	1100
STPS30SM100ST	100	30	530	150	900
STPS30M100DJF	100	30	200	150	600
STPS30U100DJF	100	30	200	150	1500
STPS30120DJF	120	30	200	150	650
STPS30170DJF	170	30	200	150	450
STPS60L30CW	30	30	600	150	2800
STPS60L40CW	40	30	600	150	2400
STPS60L45CW	45	30	600	150	2400
STPS6045CW/CP/CPI	45	30	400	175	1600
STPS61L45CT/CW	45	30	500	150	1700
STPS61L60CT/CW	60	30	400	150	1300
STPS60H100CT	100	30	300	175	850
STPS61H100CW	100	30	450	175	1200
STPS60150CT	150	30	270	175	600
STPS61150CW	150	30	500	175	1200
STPS60170CT	170	30	270	175	1200
STPS61170CW	170	30	500	175	1200
STPS80L60CY	60	40	400	150	5500
STPS80H100CY	100	40	400	175	1900
STPS80H100CTV	100	40	700	150	1900
STPS80150CW	150	40	500	175	1300
STPS80170CW	170	40	500	175	1300
STPS120L15CTV	15	60	1200	125	6800
STPS12045CTV	45	60	900	150	3100
STPS16045CTV	45	80	900	150	3100
STPS160H100CTV	100	80	1000	150	3800
STPS200170CTV	170	100	700	150	3800

Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ

КАФЕДРА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТА  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА

КОНТРОЛЬНА РОБОТА  
з навчальної дисципліни  
**«СИЛОВА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА»**

Виконав  
студент групи  
ПІБ

Перевірив  
ПІБ

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Силова перетворювальна техніка» для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладач к. т. н., доц. В. О. Мельников

Відповідальний за випуск зав. кафедри систем автоматичного управління та електропривода Родькін Д. Й.

Підп. до др. \_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_. Наклад \_\_\_\_\_ прим. Зам. № \_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Видавничий відділ  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600