

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СИЛОВІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електронні компоненти і системи»
спеціальності 171 Електроніка

Укладачі: В.Я. Ромашко В.Я. Л.М. Батрак, А.В. Заграничний

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Попович П.В.*, доцент, кандидат технічних наук,
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Вербицький Є.В.*, професор, доктор технічних наук

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 01/2023 від 30.01.2023 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)*

Навчально-методичне видання містять загальні вимоги до виконання та оформлення розрахунково-графічної роботи з дисципліни “Силові електронні прилади та пристрої” для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електронні компоненти та системи», спеціальності 171 Електроніка.

Розрахунково-графічна робота присвячена аналізу режимів роботи та визначення технічних характеристик однофазних випрямлячів змінного струму. Метою методичних вказівок є ознайомлення студентів з особливостями розрахунку випрямлячів у випадку, коли джерелом живлення випрямляча є автономний інвертор, який на відміну від мережі змінного струму формує на вході випрямляча не синусоїдальну, а прямокутну або ступінчасту форму напруги. Це дає змогу студентам ознайомитись з принципом дії та особливостями роботи різних типів однофазних випрямлячів та отримати практичні навички з їх розрахунку та обґрунтованого вибору елементів.

Навчальний посібник містить короткі теоретичні відомості про особливості роботи різних типів випрямлячів, основні розрахункові співвідношення, сформульовано завдання на розрахункову –графічну роботу та вимоги до її оформлення. Наведено приклад виконання роботи.

Реєстр. № НП 22/23-150. Обсяг 0.55 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	8
ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	13
ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ	17
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ	
РОБОТИ.....	26
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	29
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	30

ВСТУП

У курсі “Силові електронні прилади та пристрої” розглядають питання, що лежать на стику двох важливих галузей сучасної науки та техніки – *енергетики* та *електроніки*. У самому загальному випадку прилади та компоненти електроніки найчастіше використовують як елементи різноманітних електричних кіл (електронних схем) з метою впливу на струми та напруги в елементах цього кола. Якщо ці струми та напруги використовують у якості носіїв інформації, їх називають електричними сигналами. Шляхом впливу на параметри цих струмів та напруг здійснюється обробка інформації, яку вони відображують. До цього класу відносять величезну кількість пристроїв – комп’ютери, мобільні телефони, телевізори, пристрої контролю та керування та багато інших.

В той же час струми та напруги в елементах електричного кола, у першу чергу, є носіями *енергії*. Якщо впливати на параметри цих струмів та напруг, тим самим буде відбуватися вплив на потік електричної енергії, що надходить від джерела енергії до споживачів. Електрична енергія характеризується певними параметрами, найважливішими з яких є такі:

- величина напруги U ;
- сила струму I ;
- частота f ;
- кількість фаз m .

Для кожного споживача необхідно забезпечити електричну енергію з певними параметрами та якісними показниками, за яких робота цих споживачів буде найбільш ефективною. Для цього використовують спеціальні електронні пристрої, які поділяються на два великі класи:

1) пристрої *інформаційної* електроніки, які призначено для зберігання, передавання, обробки та відображення інформації, яка представлена у вигляді електричних сигналів.

2) пристрої *енергетичної* електроніки, які призначено для перетворення та регулювання параметрів електричної енергії, що передається від джерела енергії до споживачів, для забезпечення найбільш сприятливих режимів роботи цих споживачів.

В курсі «Силові електронні прилади та пристрої» розглядають саме такі пристрої.

Переважна кількість електричної енергії виробляється централізовано на електростанціях у вигляді трифазного змінного струму частотою 50 Гц. В той же час для деяких споживачів необхідний змінний струм, частота якого відрізняється від стандартної частоти промислової мережі.

Іноді виникає необхідність мати іншу кількість фаз змінної напруги. Дуже часто виникає необхідність регулювати величину напруги або струму в навантаженні, частоту змінного струму. Наприклад, в електроприводі виникає необхідність регулювання швидкості обертання двигуна в широкому діапазоні. Найчастіше це здійснюється шляхом регулювання *напруги* живлення двигуна. Для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів найбільш ефективним методом є регулювання *частоти* його напруги живлення.

На сьогодні, понад 30% електричної енергії, що виробляється, споживається у вигляді постійного струму. Наприклад, усі електрохімічні процеси (електроліз, гальванотехніка, заряджання акумуляторів), багато видів електротранспорту, в сучасних технологічних процесах використовують *постійний* струм.

Джерелами живлення сучасної електронної апаратури різного призначення найчастіше є джерела *постійної* напруги. Застосування постійного струму має тенденцію до зростання. У значній мірі це пов'язано з широким використанням *нетрадиційних* та *відновлювальних* джерел електричної енергії, більшість яких є джерелами *постійного* струму.

У зв'язку з цим зростає необхідність у пристроях, які б без суттєвих втрат могли б перетворювати та регулювати параметри електричної енергії,

отримані від первинного джерела живлення (промислова мережа, хімічні джерела струму, нетрадиційні та відновлювальні джерела електричної енергії). Найчастіше виникає необхідність здійснювати такі види перетворень:

- змінний струм у постійний;
- постійний струм у змінний;
- змінний струм однієї частоти у змінний струм іншої частоти;
- кількість фаз змінної напруги;
- регулювати величину напруги або струму;
- регулювати частоту змінного струму;
- стабілізувати величину постійної напруги або струму;
- одержання струмів та напруг заданої форми.

Пристрої, що здійснюють подібні перетворення отримали назву «перетворювачі параметрів електричної енергії», або «*пристрої перетворювальної техніки*».

В курсі «Силові електронні прилади та пристрої» розглядають елементну базу, принцип дії та галузі застосування найважливіших типів сучасних перетворювачів.

У зв'язку з тим, що у промислових масштабах, електричну енергію виробляють у вигляді *змінного* струму, а значна кількість споживачів потребує постійний струм, широке застосування отримали перетворювачі змінного струму у постійний – *випрямлячі*.

Випрямлячі мають дві основні галузі застосування.

- 1) Перетворення змінного струму промислової мережі у постійний.
- 2) Одержання постійної напруги, величина якої суттєво відрізняється від постійної напруги джерела живлення.

Якщо джерелом живлення є джерело *постійної* напруги певної величини, а споживачу постійного струму необхідна постійна напруга іншої величини, спочатку, за допомогою автономного інвертора, постійну напругу джерела перетворюють у *змінну*. Використовуючи трансформатор, на

вторинній обмотці отримують необхідну величину *змінної* напруги, яку за допомогою *випрямляча* перетворюють в постійну напругу заданої величини.

У випадку живлення від промислової мережі, напруга на вході випрямляча має синусоїдальну форму. Вихідна напруга автономних інверторів найчастіше має *прямокутну* або *ступінчасту* форму .

Розрахунок випрямлячів при такій формі вхідної напруги має певні особливості. Саме такий випадок розглядається в пропонованій розрахунково-графічній роботі. В ній, для заданої змінної напруги ступінчастої форми, що діє на вході однофазного випрямляча, необхідно:

- побудувати графіки струмів та напруг в усіх елементах;
- розрахувати режими роботи вентилів та трансформатора;
- визначити основні параметри та характеристики випрямляча.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Випрямляч - це пристрій, призначений для перетворення змінної напруги у постійну [1]. Основним елементом будь-якого випрямляча є вентильна схема, яка забезпечує одностороннє протікання струму через навантаження R_n . При живленні від однофазної мережі змінного струму використовують три схеми випрямлячів:

- 1) однопівперіодна;
- 2) з нульовим виводом трансформатора;
- 3) мостова 0 [4].

Усі три схеми відрізняються принципом дії, а також основними параметрами та характеристиками. Як правило, на вході випрямляча стоїть трансформатор, який забезпечує необхідну величину випрямленої напруги, а також електричну розв'язку навантаження від мережі живлення. На виході вентильної схеми випрямлена напруга є пульсуючою, тобто крім постійної складової містить також змінну складову. Для зменшення змінної складової випрямленої напруги на виході випрямляча ставлять згладжувальні фільтри. У даній розрахунковій роботі розглядаються робота випрямляча на активне навантаження R_n [3, 4].

Основні параметри випрямляча

Середнє значення I_{CP} характеризує електрохімічну дію струму і визначається як

$$I_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt,$$

де $i(t)$ - закон зміни струму на періоді; T -період повторення струму [4].

Аналогічно визначається середнє значення напруги

$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Діюче значення I_D характеризує **енергетичну** дію струму і визначається, як

$$I_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Діюче значення напруги

$$U_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Для визначення середніх та діючих значень струмів та напруг треба знати закон зміни (графік) відповідного струму або напруги, а також їх параметри. Якщо струм або напруга на періоді має дискретно-безперервний характер, інтеграли у наведених вище формулах розбиваються на суму інтегралів по інтервалам безперервності [4].

Режим роботи вентилів випрямляча повністю визначається середнім та діючим значенням протікаючого струму, а також **максимальною** величиною зворотної напруги на вентилі. За цими параметрами з довідника вибирають відповідний тип вентиля. [8, 9]

В довідниках вказують *максимально допустимі* параметри вентилів. А при розрахунках отримують *робочі параметри*. Оскільки в процесі роботи випрямляча можуть змінюватися зовнішні умови, а отже і режим роботи елементів, необхідно, щоб *максимально допустимі* параметри обраних вентилів перевищували їх розрахункові *робочі* параметри. Відношення робочого струму або напруги вентиля до його *максимально допустимого*, називають **коефіцієнтом навантаження** [4]

$$K_H^I = \frac{I_P}{I_{m.доп.}}$$

$$K_H^U = \frac{U_P}{U_{m.доп.}}$$

Для діодів рекомендована величина K_H становить 0.7 ... 0.9. [4]

Для оцінки ефективності використання вентиля у конкретній схемі вводять такі параметри:

коефіцієнт форми струму

$$K_{\phi} = I_{VDд} / I_{VDCP},$$

коефіцієнт використання вентиля за напругою

$$K_{VDu} = U_{HCP} / U_{VDm},$$

де U_{HCP} – середнє значення напруги на виході випрямляча.

Вибір трансформатора здійснюється з умови забезпечення його нормального теплового режиму. Тепловий режим роботи трансформатора визначається **повною** потужністю, яка проходить через трансформатор. [3]

Розрахункова потужність первинної та вторинної обмотки трансформатора

$$S_1 = U_{1д} \cdot I_{1д}; S_2 = U_{2д} \cdot I_{2д},$$

де: $U_{1д}, U_{2д}$ - діючі значення напруги на обмотках; $I_{1д}, I_{2д}$ - діючі значення струму через обмотки. [4]

Оскільки схема з нульовим виводом містить дві однакові вторинні обмотки, для неї

$$S_2 = 2U_{2д} \cdot I_{2д}.$$

Типова (розрахункова) потужність трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}.$$

Ефективність використання трансформатора у схемі випрямляча характеризується параметром - **коефіцієнт використання трансформатора за потужністю**

$$K_{TVp} = \frac{P_H}{S_T},$$

де $P_H = U_{HCP} I_{HCP}$ - потужність постійних складових випрямленої напруги та струму. [1]

Як будь-який споживач електричної енергії випрямляч характеризується параметром **коефіцієнт потужності**

$$\chi = P/S,$$

де P - активна потужність, що споживається від мережі; S - загальна потужність, що споживається від мережі. [1]

У загальному випадку

$$P = \sum_{q=0}^{\infty} U_{1(q)} \cdot I_{1(q)} \cdot \cos \phi_{(q)},$$

де q – номер гармоніки при розкладанні струму та напруги первинної обмотки трансформатора у ряд Фур'є

$$S = U_{1д} \cdot I_{1д} = S_1.$$

Для даного випадку, враховуючи, що трансформатор та вентиля вважаються ідеальними (без втрат потужності), можна вважати, що вся активна потужність, що споживається від мережі, витрачається у навантаженні R_n . [2]

Отже

$$P = U_{нд} \cdot I_{нд} = I_{нд}^2 R_d = U_{нд}^2 / R_n,$$

де $U_{нд}$ та $I_{нд}$ - **дійоче** значення напруги та струму в навантаженні.

Як зазначалося, випрямлена напруга на виході вентиляльної схеми є пульсуючою. Ступінь пульсації напруги оцінюють за допомогою параметра **коефіцієнт пульсації**

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\sim m}}{U_{нсп}},$$

де $U_{\sim m}$ - амплітудне значення змінної складової пульсації, $U_{нсп}$ - постійна складова пульсуючої напруги, яка дорівнює середньому значенню випрямленої напруги. Змінна складова пульсуючої напруги на виході випрямляча має досить складну форму. [2, 4]

Тому найчастіше **коефіцієнт пульсації** випрямленої напруги визначають через **1-у гармоніку** пульсації випрямленої напруги

$$K_{П(1)} = \frac{U_{m(1)}}{U_{HCP}},$$

де $U_{m(1)}$ - амплітуда 1 - ї гармоніки пульсації; U_{HCP} - постійна складова випрямленої напруги. [2, 4]

Для знаходження $U_{m(1)}$ треба випрямлену напругу $u_H(t)$ розкласти в ряд Фур'є (визначити сталу складову $U_0 = U_{HCP}$ та амплітуду 1- ї гармоніки $U_{m(1)}$).

Середнє значення випрямленої напруги U_{HCP} та першу гармоніку пульсації $u_{H(1)}(t)$ треба побудувати на графіку випрямленої напруги $u_H(t)$. Якщо розрахунки виконано вірно, то сума $U_{HCP} + u_{H(1)}(t)$ повинна наближатися до форми випрямленої напруги $u_H(t)$. [4].

ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Визначити основні параметри однофазного випрямляча, що працює від мережі змінного струму із ступінчатою формою напруги на активне навантаження.

Для заданої схеми випрямляча та відомих параметрах напруги мережі, вважаючи трансформатор та вентилі ідеальними, а коефіцієнт трансформації

$$\text{трансформатора } n = \frac{\varpi 1}{\varpi 2} = 1:$$

1. Побудувати у відповідному масштабі часові діаграми струмів та напруг на обмотках трансформатора, вентилях та навантаженні, при активному (R) навантаженні випрямляча.

2. Розрахувати:

а) середнє значення випрямленої напруги та струму $U_{H_{CP}}$; $I_{H_{CP}}$;

б) режим роботи вентилів випрямляча:

- середнє значення струму вентиля $I_{VD_{CP}}$;
- діюче значення струму вентиля $I_{VD_{Д}}$;
- амплітуду зворотної напруги на вентилі $U_{VD_{m}}$;
- коефіцієнт форми струму вентиля K_{ϕ} ;
- коефіцієнт використання вентиля за напругою $K_{VD_{u}}$;

Вибрати за допомогою довідника відповідний тип вентиля та навести його основні параметри; розрахувати коефіцієнти навантаження вентилів за струмом та напругою.

в) розрахункові потужності первинної та вторинної обмоток трансформатора S_1 та S_2 , а також типову (розрахункову) потужність трансформатора S_T ;

г) коефіцієнт використання трансформатора за потужністю K_{TVP} ;

д) коефіцієнт потужності випрямляча χ ;

е) розкласти в ряд Фур'є випрямлену напругу $U_H(t)$ та визначити сталу складову U_0 , а також амплітуду першої гармоніки пульсації $U_{m(1)}$;

ж) розрахувати коефіцієнт пульсації випрямленої напруги за першою гармонікою $K_{п(1)}$;

На графіку випрямленої напруги $U_H(t)$ показати постійну складову випрямленої напруги $U_0 = U_{H\text{cp}}$, а також 1-у гармоніку пульсації $U_{m(1)}$

$$U'_H(t) = U_0 + U_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi).$$

Форма діючої напруги наведена на рис. 1.

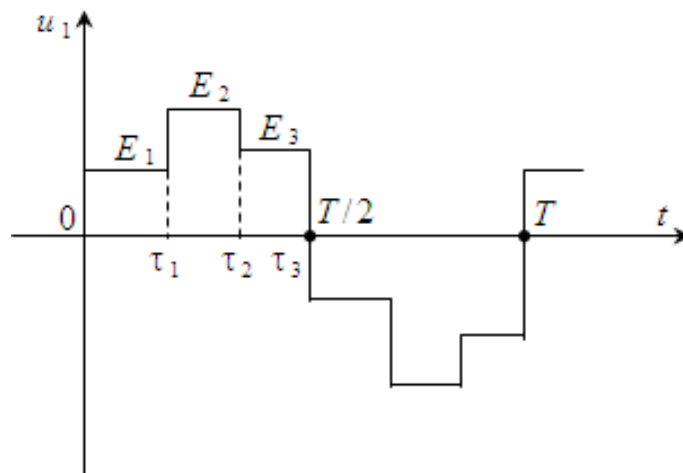


Рис. 1.

Визначення номера варіанта

Номер варіанта складається з трьох цифр abc, де bc - номер за списком групи, а - номер групи, який вказує викладач.

Числові параметри варіанта завдання визначаються з табл. 1, 2, 3.

Номер варіанта з табл. 1 = c;

Номер варіанта з табл. 2 = c + b;

Номер варіанта з табл. 3 = a + b + c.

Якщо одержаний номер варіанта складається з двох цифр, береться остання цифра (молодший розряд).

Якщо число утворене цифрами *bc* **кратне трьом** – розраховується однофазна **однопівперіодна** схема.

Якщо число утворене цифрами *bc* **не кратне трьом**, але **кратне двом**, розраховується однофазна схема з **нульовим виводом** трансформатора.

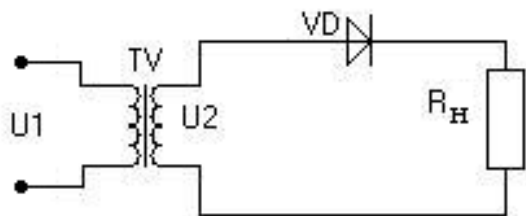
В **інших випадках** розраховується однофазна **мостова** схема.

Приклад: номер групи $a = 2$, номер за списком 26, отже $abc = 226$.

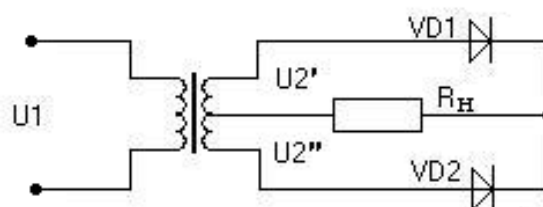
Номера варіантів з табл. 1 – 6; з табл. 2 – 8; з табл. 3 – 0. Відповідно вибирається схема однофазна з нульовим виводом.

Схема випрямляча

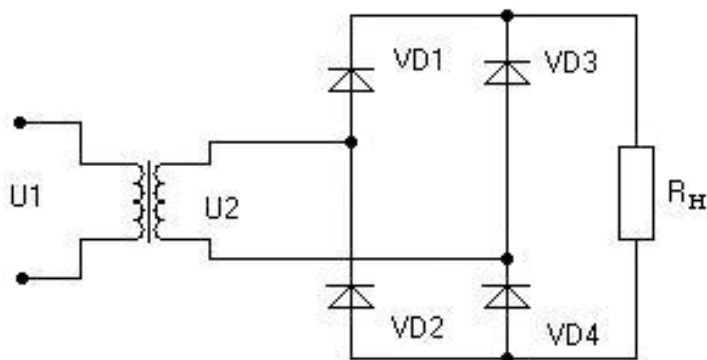
Схеми випрямляча наведено на рис. 2.



а) Однопівперіодна схема



б) Схема з нульовим виводом трансформатора



в) Мостова схема

Рис. 2

Звіт про роботу повинен містити:

1) часові діаграми струмів та напруг побудовані у відповідному масштабі. Масштаб повинен бути проставлений на осях системи координат. На часових діаграмах повинні бути представлені: u_1 ; u_2 ; i_1 ; i_2 ; u_H ; i_H ; u_{VD} ; i_{VD} .

Крім того на відповідних часових діаграмах відкласти величини U_{Hcp} та I_{Hcp} , а також першу гармоніку пульсації $u_{H(1)}(t)$, одержані в результаті розрахунків;

- 2) розрахунок параметрів випрямляча;
- 3) висновки по роботі.

Варіанти завдання

Таблиця 1

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметр										
Півперіод $T/2$ діючої напруги [мс]	0.18	0.24	0.3	0.6	0.9	3	6	9	12	15
Опір навантаження R_H [Ом]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Таблиця 2

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напруга [В]										
E_1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
E_2	50	40	90	100	90	20	0	50	40	30
E_3	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

Таблиця 3

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тривалість інтервалів										
$\tau_1 / \frac{T}{2}$	1/6	1/6	1/6	1/6	2/6	2/6	2/6	3/6	3/6	4/6
$\tau_2 / \frac{T}{2}$	1/6	2/6	3/6	4/6	1/6	2/6	3/6	1/6	2/6	1/6
$\tau_3 / \frac{T}{2}$	4/6	3/6	2/6	1/6	3/6	2/6	1/6	2/6	1/6	1/6

ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Параметри для виконання завдання:

1. півперіод вхідної напруги $T/2$ - 1 мс;
2. опір навантаження R_H - 10 Ом;
3. напруга E_1 - 50 В;
4. напруга E_2 - 100 В;
5. тривалість інтервалу $\tau_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2}$ - 0,5 мс;
6. тривалість інтервалу $\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2}$ - 0,5 мс.

Напруга u_1 наведена на рис. 3

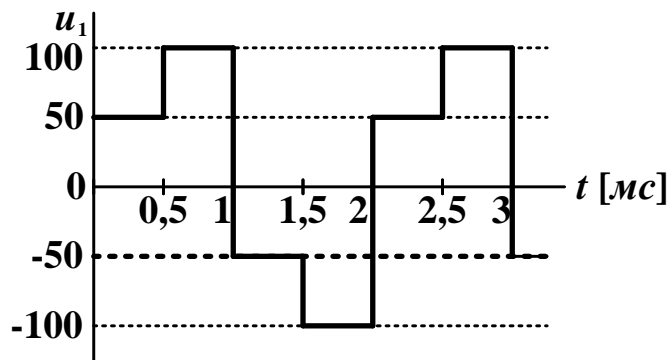


Рис. 3

Схема випрямляча з нульовим виводом трансформатора показана на рис. 4.

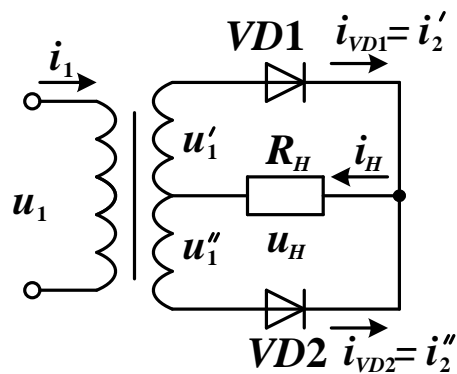
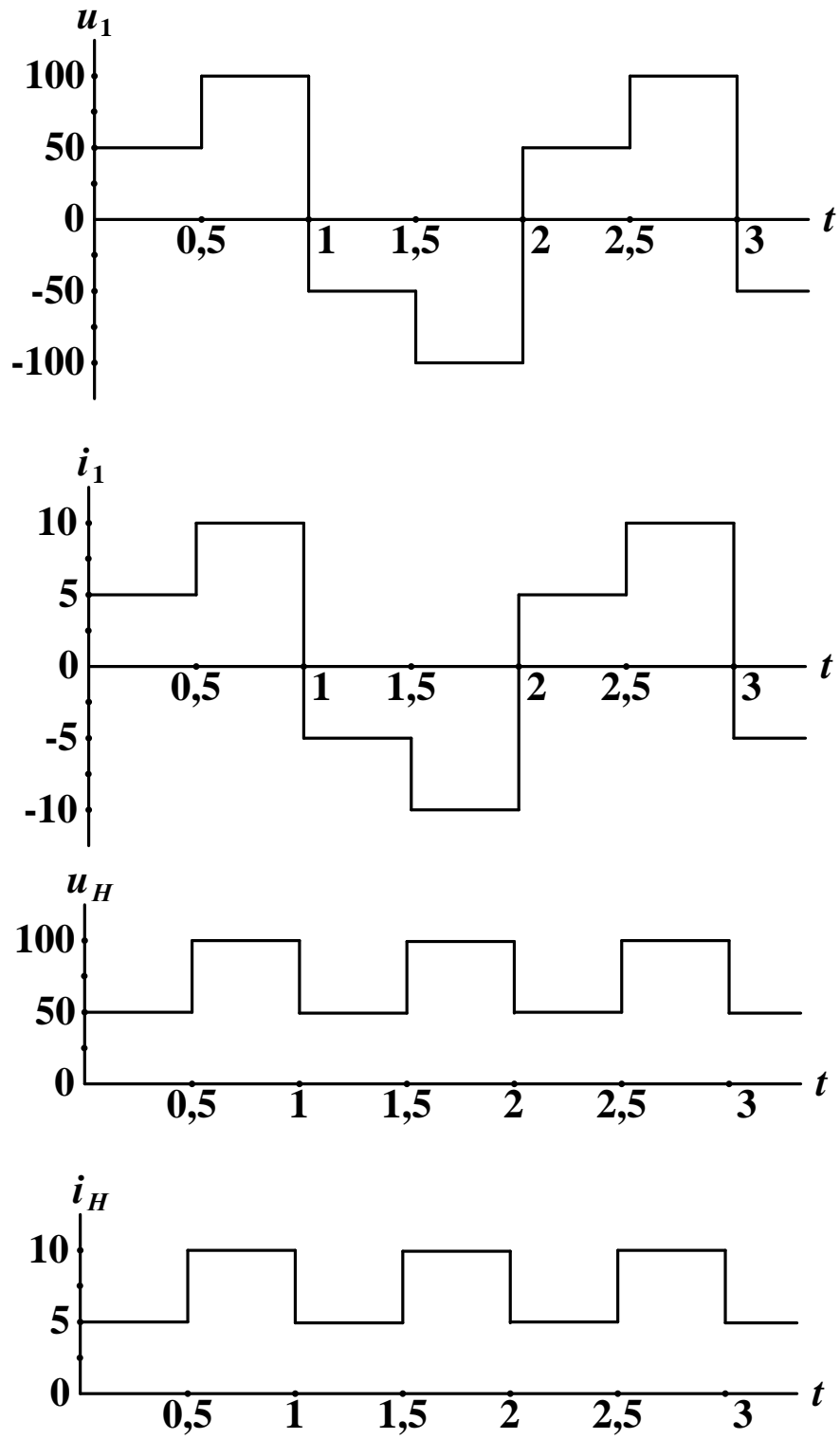


Рис. 4

1. Часові діаграми струмів та напруг в елементах схеми випрямляча наведені на рис. 5.



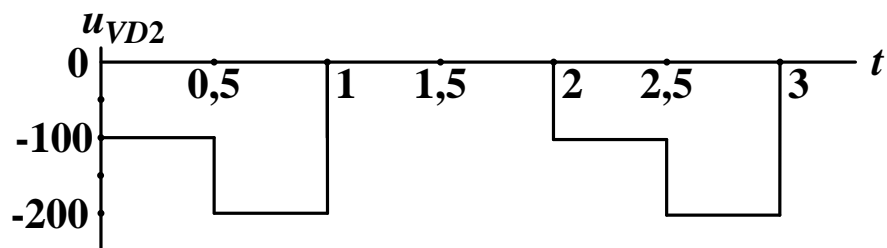
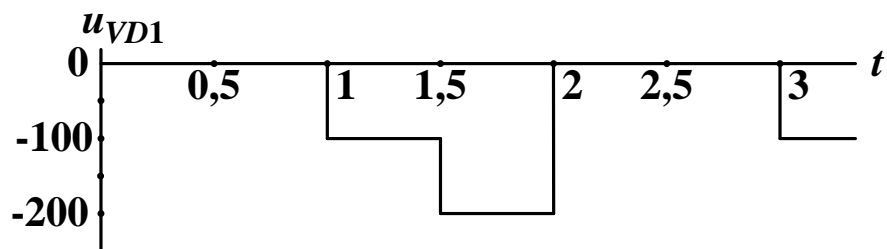
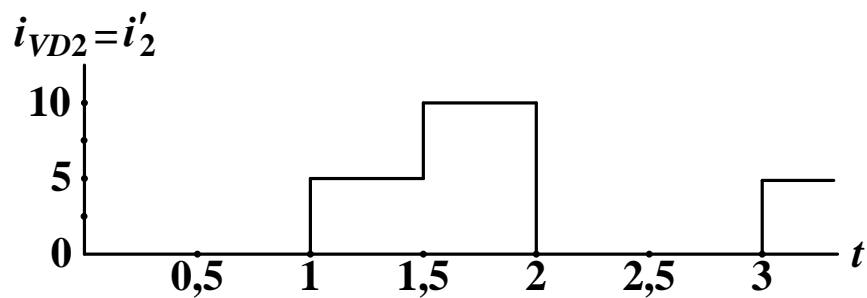
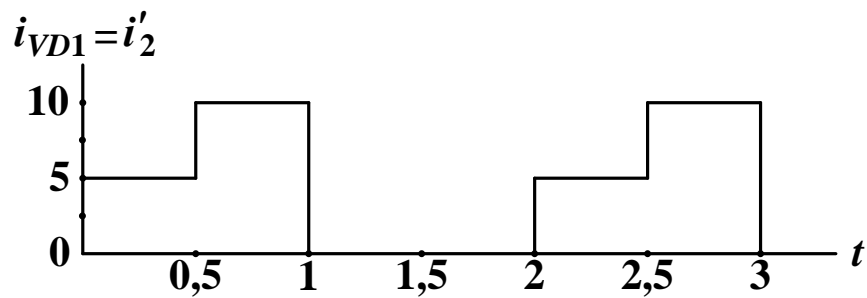
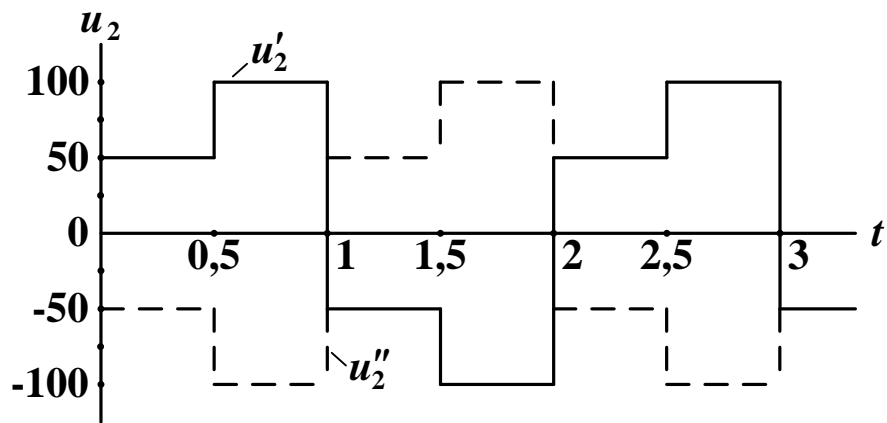


Рис. 5

2. Розрахунки проводяться в наступній послідовності.

а) середнє значення випрямленої напруги та струму (період випрямленої напруги $T_{\text{випр}}=T/2$):

$$U_{\text{Hcp}} = \frac{1}{T_{\text{випр}}} \int_0^T u(t) dt = \frac{2}{T} \left(\int_0^{\tau_1} E_1 dt + \int_0^{\tau_2} E_2 dt \right) =$$
$$= \frac{2}{2} \left(\int_0^{0,5} 50 dt + \int_0^{0,5} 100 dt \right) = 75 \text{ В};$$

$$I_{\text{Hcp}} = U_{\text{Hcp}} / R_H = 75 / 10 = 7,5 \text{ А};$$

б) режим роботи вентилів випрямляча:

- середнє значення струму вентилів в два рази менше за середнє значення випрямленого струму, оскільки вентиля працюють по чергово:

$$I_{\text{VD1cp}} = I_{\text{VD2cp}} = I_{\text{Hcp}} / 2 = 7,5 / 2 = 3,75 \text{ А};$$

- діюче значення струму вентилів (період роботи вентилів дорівнює T)

$$I_{\text{VD1}\delta} = I_{\text{VD2}\delta} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} =$$
$$= \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{\tau_1} \left(\frac{E_1}{R_H} \right)^2 dt + \int_0^{\tau_2} \left(\frac{E_2}{R_H} \right)^2 dt \right)} =$$
$$= \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{0,5} 5^2 dt + \int_0^{0,5} 10^2 dt \right)} =$$
$$= \sqrt{\frac{1}{2} (12,5 + 50)} = \sqrt{31,25} = 5,6 \text{ А};$$

- амплітуда зворотної напруги на вентилях відповідно до графіків часових діаграм:

$$U_{\text{VD1m}} = U_{\text{VD2m}} = 200 \text{ В};$$

- коефіцієнт форми струму вентилів:

$$K_\phi = \frac{I_{\text{VD}\delta}}{I_{\text{VDcp}}} = \frac{5,6}{3,75} = 1,5;$$

- коефіцієнт використання вентилів за напругою:

$$K_{VD\cup} = \frac{U_{Hcp}}{U_{VDm}} = \frac{75}{200} = 0,375.$$

За допомогою довідників обираємо відповідний тип вентилів для випрямляча, наприклад діод типу KD213B, який має наступні максимально-допустимі параметри:

$$U_{3B \max} = 300\text{В};$$

$$I_{np \max} = 10\text{А};$$

$$f_{\max} = 100\text{кГц}.$$

- визначаємо коефіцієнт навантаження діодів по струму та напрузі в розрахованій схемі:

$$K_H^I = \frac{I_{VDcp}}{I_{np \max}} = \frac{7,5}{10} = 0,75;$$

$$K_H^U = \frac{U_{VDm}}{U_{3Bm}} = \frac{200}{300} = 0,67;$$

в) визначаємо розрахункові потужності первинної та вторинної обмотки трансформатора, а також типову (розрахункову) потужність трансформатора S_T :

- діюче значення напруги на первинній, а також секціях вторинної обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} U_1 = U_2 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_1^2(t) dt} = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u_1^2(t) dt} = \\ &= \sqrt{2 \cdot \frac{1}{T} \left(\int_0^{\tau_1} E_1^2 dt + \int_0^{\tau_2} E_2^2 dt \right)} = \sqrt{\left(\int_0^{0,5} 2500 dt + \int_0^{0,5} 10000 dt \right)} = \\ &= \sqrt{1250 + 5000} = \sqrt{6250} = 79\text{В}; \end{aligned}$$

- діюче значення струму первинної обмотки:

$$I_1 = U_1 / R_H = 79 / 10 = 7,9\text{А};$$

- діюче значення струму вторинних обмоток співпадає з діючими значенням струму вентилів:

$$I_2 = I_2'' = I_{VD\emptyset} = 5,6\text{А};$$

- розрахункова потужність первинної обмотки трансформатора:

$$S_1 = U_1 I_1 = 79 \cdot 7,9 = 624,1 \text{ ВА};$$

- розрахункова потужність двох секцій вторинної обмотки:

$$S_2 = 2U_2 I_2 = 2 \cdot 79 \cdot 5,6 = 884,8 \text{ ВА};$$

- типова розрахункова потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{624,1 + 884,8}{2} = 754,45 \text{ ВА};$$

г) коефіцієнт використання потужності трансформатора:

$$K_{TVP} = \frac{P_H}{S_T} = \frac{U_{Hcp} I_{Hcp}}{S_T} = \frac{75 \cdot 7,5}{754,45} = 0,75;$$

д) коефіцієнт потужності випрямляча:

Оскільки форма струму та напруги первинної обмотки трансформатора співпадають, гармонічний склад струму та напруги, що споживаються від мережі, буде однаковим. При цьому діючі значення струму та напруги на навантаженні такі самі, як і у первинній обмотці трансформатора. Отже:

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{U_{нд} I_{нд}}{U_1 I_1} = 1.$$

е) визначаємо сталу складову U_o , а також амплітуду 1-ї гармоніки пульсації випрямленої напруги U_m . Скористаємося формулами ряду Фур'є:

- період випрямленої напруги

$$T_{випр} = T/2 = 1 \text{ мс};$$

отже кутова частина 1-ї гармоніки пульсації

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{випр}} = 6,28 \text{ рад/мс};$$

- стала складова випрямленої напруги

$$\begin{aligned} U_o = a_o &= \frac{1}{T_{випр}} \left(\int_0^{\tau_1} E_1 dt + \int_0^{\tau_2} E_2 dt \right) = \left(\int_0^{0,5} 50 dt + \int_0^{0,5} 100 dt \right) = \\ &= (25 + 50) = 75 \text{ В}, \end{aligned}$$

тобто співпадає з середнім значенням випрямленої напруги: $a_o = U_o = U_{Hcp}$;

- амплітуда косинусної складової 1-ї гармоніки пульсації

$$a_1 = \frac{2}{T_{\text{випр}}} \left(\int_0^{\tau_1} E_1 \cos \omega t dt + \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} E_2 \cos \omega t dt \right) =$$

$$= 2 \left(\int_0^{0,5} 50 \cos \omega t dt + \int_{0,5}^1 100 \cos \omega t dt \right) = 0$$

- амплітуда синусної складової 1-ї гармоніки пульсації

$$p_1 = \frac{2}{T_{\text{випр}}} \left(\int_0^{\tau_1} E_1 \sin \omega t dt + \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} E_2 \sin \omega t dt \right) =$$

$$= 2 \left(\int_0^{0,5} 50 \sin \omega t dt + \int_{0,5}^1 100 \sin \omega t dt \right) = -31,8.$$

Для зручності побудови графіка пульсації представляємо 1-у гармоніку пульсації у вигляді синусоїди з початковою фазою

$$u_{(1)}(t) = U_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$\text{де } U_{m(1)} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \sqrt{0^2 + (-31,8)^2} = 31,8 \text{ В};$$

$$\varphi_1 = \text{arctg} \left| \frac{a_1}{b_1} \right| = \text{arctg} \left| \frac{0}{31,8} \right| = 0.$$

Враховуючи, що вектор b_1 розташований на границі II та III квадрантів системи координат, фазовий кут 1-ї гармоніки пульсації

$$\varphi_1 = \pi - \varphi' = \pi + \varphi' = \pi.$$

Оскільки випрямлена напруга $u_H(t)$ містить постійну та змінну складові, з використанням 1-ї гармоніки пульсації її можна описати наступним чином

$$u_H'(t) = U_o + U_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_1) = 75 + 31,8 \sin(\omega t + \pi).$$

Будуємо на графіку випрямленої напруги u_H (рис. 6) функцію $u_H'(t)$. Якщо розрахунки проведено правильно, функція $u_H'(t)$ приблизно описуватиме форму випрямленої напруги $u_H(t)$.

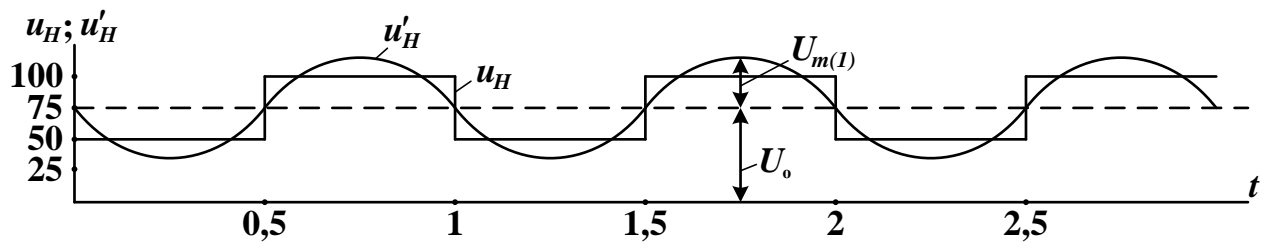


Рис. 6

ж) розраховуємо коефіцієнт пульсації випрямленої напруги за першою гармонікою

$$K_{П(1)} = \frac{U_{m(1)}}{U_{\text{Hcp}}} = \frac{31,8}{75} = 0,424.$$

ВИСНОВКИ

Основні розрахункові співвідношення та параметри випрямлячів з нульовим виводом трансформатора та мостової схеми співпадають. Однак в нульовій схемі зворотна напруга на вентилях в два рази більша, а трансформатор має більш складну конструкцію. Тому коефіцієнт використання потужності трансформатора в нульовій схемі є гіршим, ніж в мостовій.

В той же час втрати потужності у вентилях нульової схеми є меншими, ніж мостової, оскільки в ній послідовно з навантаженням працює лише один вентиль. Тому при випрямлених напругах $U_H < 10V$ ККД нульової схеми буде більшим, ніж мостовій.

Основна галузь застосування нульової схеми - низьковольтні випрямлячі.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Розрахунково-графічна робота (РГР) оформлюється відповідно до вимог ДСТУ 3008-95 “Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення”.

Згідно з вимогами розрахунково-графічна робота виконується українською мовою на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 (210x297 мм).

Текст роботи необхідно розташовувати, залишаючи береги таких розмірів: лівий – не менш ніж 20 мм, правий – не менш ніж 10 мм, верхній – не менш ніж 20 мм, нижній – не менш ніж 20 мм. При оформленні РГР за допомогою комп’ютера текст друкують через полуторний міжрядковий інтервал, шрифт 14.

РГР складається з титульної сторінки, змісту, вступу, текстової частини, списку використаних джерел, додатків.

Зміст РГР – це послідовний перелік заголовків всіх розділів, підрозділів, пунктів текстової частини, списку використаних джерел, назв і номерів додатків із зазначенням номера сторінки на якій вони розташовані.

Текст основної частини РГР поділяють на розділи, підрозділи, пункти та підпункти. Усі розділи, підрозділи, пункти повинні мати змістовні назви. Заголовки структурних частин РГР пишуть великими літерами, а заголовки підрозділів – маленькими літерами /крім першої великої/ з абзацу. Крапку в кінці заголовка не ставлять.

Нумерація сторінок тексту наскрізна: перша сторінка – титульна, друга – рецензія (не рахується до складу), третя – зміст і т.д. Номер сторінки проставляється арабськими цифрами у правому верхньому куті без крапки в кінці. Титульна сторінка і рецензія не нумеруються.

Текст підпункту (пункту) повинен складатися з абзаців, у яких, як правило, висловлюється одна закінчена думка.

Кожен абзац починається з нового рядка.

Ілюстрації і таблиці необхідно подавати в РГР безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. Ілюстрації й таблиці, які розміщені на окремих сторінках РГР, включають до загальної нумерації сторінок.

Таблиці нумерують послідовно (за винятком таблиць, поданих у додатках) в межах розділу. Таблицю розмішують після першого згадування про неї в тексті таким чином, щоб її можна було читати без повороту переплетеного блоку РГР або з поворотом за годинниковою стрілкою. Заголовки граф таблиці повинні починатися з великих літер, підзаголовки – з маленьких, якщо вони складають одне речення із заголовком, і з великих, якщо вони є самостійними. Графу з порядковими номерами рядків до таблиці включати не треба.

Примітки до тексту і таблиць, в яких вказують довідкові та пояснювальні дані, нумерують послідовно в межах однієї сторінки.

Формули в РГР (якщо їх більше однієї) нумерують у межах розділу. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, між якими ставлять крапку.

Посилання у тексті на джерела можуть наводитись у вигляді підрядкової примітки або вказаного порядкового номеру за списком використаної літератури, виділеного квадратними дужками.

Список використаних джерел розташовується після висновків. Рекомендується дотримуватись наступної послідовності: закони України, постанови Верховної Ради України, укази Президента України, постанови, положення, інструкції міністерств і відомств України. Усі нормативні документи, крім того, записуються у хронологічній послідовності. Інші літературні джерела (підручники, посібники, монографії, журнальні та газетні статті) слід розташовувати за алфавітом.

Додатки оформлюють на сторінках, наступних за списком використаних джерел, розміщуючи їх у порядку посилань у тексті РГР. Кожний додаток

повинен починатися з нової сторінки та мати заголовок, записаний угорі малими літерами з першої великої симетрично відносно тексту сторінки. Посередині рядка над заголовком малими літерами з першої великої записується слово “Додаток” і вказується його номер та назва.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаров, Ю. П. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
2. ДСТУ 3008-95 “Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення”.
3. ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 Єдина система конструкторської документації. Загальні положення (ГОСТ 2.001-93, IDT).
4. ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 ЄСКД. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT).
5. Пристрої перетворювальної техніки: конспект лекцій / укладач А. І. Новгородцев. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 124 с.
6. Ромашко В. Я., Батрак Л. М. Енергетична електроніка: Конспект лекцій. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 117 с.
7. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина І., – Київ, ICDO, 1996. – 262 с.
8. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – Київ: Либідь, 1993. – 432 с. ISBN 5-325-00332-1.
9. В. І. Сенько К. В. Трубіцин В. І. Чибеліс Силова перетворювальна техніка. Конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 241 с.
10. Jean Pollefliet Power Electronics: Switches and Converters. – Academic Press. 2017. – 544 p. ISBN-13: 978-0128146439.
11. Keng C. Wu Power Electronic System Design. Elsevier, 2021, – 405 p., ISBN: 9780323885423.
12. Robert W. Erickson, Dragan Maksimović Fundamentals of Power Electronics. Springer; 3rd ed., 2020. – 1103 p., ISBN-13: 978-3030438791.
13. Weidong Xiao Power Electronics Step-by-Step: Design, Modeling, Simulation, and Control 1st Edition. - McGraw Hill, 2021, – 352 p., ISBN-13: 978-1260456974.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гончаров, Ю. П. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
2. Ромашко В. Я., Батрак Л. М. Енергетична електроніка: Конспект лекцій. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 117 с.
3. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина I., – Київ, ICDO, 1996. – 262 с.
4. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – Київ: Либідь, 1993. – 432 с. ISBN 5-325-00332-1.