

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 1

## ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від \_\_ \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
№\_\_

### МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для проведення практичного заняття №1 з навчальної дисципліни «Електроживлення систем зв'язку»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
освітньо-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»  
освітньо-професійна програма «Інформаційні відеосистеми та системи  
контролю доступу»  
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій  
кафедра комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях

Рекомендовано на засіданні  
кафедри комп'ютерних  
технологій у медицині та  
телекомунікаціях  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.,  
протокол № \_\_\_\_

Розробник: ст. викладач кафедри комп'ютерних технологій у медицині та  
телекомунікаціях  
БЕНЕДИЦЬКИЙ Василь

Житомир  
2024

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 2

## Практичне заняття №1

### РОЗРАХУНОК СХЕМ ВИПРЯМЛЕННЯ ОДНОФАЗНОЇ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** вивчення методів розрахунку та вибору параметрів компонентів однофазного некерованого випрямляча.

#### Теоретичні відомості

#### 1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ВИПРЯМЛЯЧА

Пристрої випрямлення використовуються для перетворення електричної енергії змінного струму в енергію постійного струму необхідної величини. Зворотне перетворення виконують інвертори.

Пристрої випрямлення (рис.1.1) здебільшого складається з трансформатора, випрямляча та згладжувального фільтра.

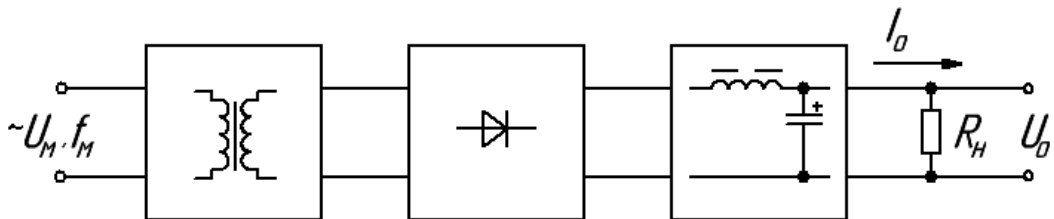


Рис.1.1 – Структурна схема пристрою випрямлення

Трансформатор перетворює змінну напругу на його первинній обмотці у більш високу або низьку напругу на вторинній обмотці, що необхідна для отримання заданої напруги на виході випрямляча.

Випрямляч перетворює більш високу або низьку напругу на вторинній обмотці трансформатора в пульсуючу, що має у своєму складі постійну складову та значну кількість гармонійних складових. Найбільшою з них є перша гармоніка, частота та амплітуда якої визначаються схемою випрямляча.

Згладжуючий фільтр призначено для зменшення (згладжування) пульсацій випрямленої напруги та струму.

Основним елементом випрямляючого пристрою є діод, який представляє собою нелінійний елемент. Опір діоду для струму, який протікає в прямому

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 3

напрямку, в сотні-тисячі раз менший, ніж для струму, який протікає у зворотному напрямку.

Режим роботи пристрою випрямлення і співвідношення між основними параметрами його елементів залежить від характеру навантаження, що включено на виході випрямляча. Розрізняють наступні основні режими роботи випрямляча: на активне навантаження; активно-ємнісне навантаження; на проти-ЕРС; активно-індуктивне навантаження; змішане навантаження.

Випадок ідеального активного навантаження випрямляча відносно рідкісний і знаходить застосування лише для живлення кіл, що не потребують обмеження змінної складової напруги.

Ємнісний характер навантаження часто зустрічається у випрямлячах малої потужності. Конденсатор встановлюється на виході випрямляча паралельно до навантаження для зменшення змінної складової випрямленої напруги. Реакція навантаження на випрямляч буде визначатися ємністю, опір якої для змінної складової набагато менше опору навантаження.

Режим роботи випрямляча проти-ЕРС є характерним при заряді акумуляторних батарей або при живленні двигунів постійного струму.

Якщо фільтр випрямляча починається з елемента, що має досить велику індуктивність, опір якої для змінної складової струму більше опору навантаження, то реакцію на випрямляч надаватиме в основному цей елемент і режим роботи випрямляча характеризуватиметься індуктивним навантаженням.

Незалежно від режиму роботи випрямляч характеризується: вихідними параметрами; параметрами, що характеризують режим роботи вентиля і параметрами трансформатора.

До вихідних параметрів випрямляча відносять:

$U_0$  – номінальне середнє значення випрямленої напруги (постійна складова), В;

$I_0$  – номінальне середнє значення випрямленого струму (постійна

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 4

складова), А;

$f_{п1}$  – частота основної гармоніки випрямленої напруги;

$k_{пк}$  – коефіцієнт пульсації випрямленої напруги.

*Коефіцієнтом пульсації* називається відношення амплітуди  $k$ -й гармоніки випрямленої напруги  $U_{omk}$  до його середнього значення  $U_0$ . Коефіцієнт пульсації може вимірюватися у відсотках по відношенню до напруги  $U_0$ . Зазвичай у випрямлячах коефіцієнт пульсації визначається за першою гармонікою випрямленої напруги, оскільки вона має найбільшу амплітуду та найменшу частоту. При живленні апаратури зв'язку пульсація також вимірюється в психофотометричних та середньоквадратичних величинах.

*Зовнішня характеристика випрямляча* – залежність вихідної напруги випрямляча  $U_0$  від струму навантаження  $I_0$  при незмінному напрузі на вході випрямляча. За цією характеристикою можна визначити номінальне значення вихідної напруги випрямляча та його внутрішній опір за постійним струмом

$$R_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}$$

Вентилі у схемах випрямлення характеризуються такими параметрами:

$I_{пр ср}$  – випрямлений струм;

$I_{пр}$  – діюче значення струму;

$I_{пр m}$  – амплітуда струму;

$U_{обр}$  – амплітуда зворотної напруги;

$P_{ср}$  – середня потужність.

За цими параметрами у схемах випрямлення проводять вибір вентилів. Значення вказаних параметрів не повинні перевищувати гранично допустимі, що зазначені в паспортних даних для вибраних типів вентилів.

Для трансформаторів, що працюють у схемах випрямлення, визначаються такі параметри:

$U_{2i}$  – діючі значення напруги вторинних обмоток;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 5

$I_{2i}$  – діючі значення струму вторинних обмоток;

$U_1$  – діюче значення напруги (ця величина відома, оскільки випрямляч включається в певну мережу змінного струму) первинної обмотки;

$I_1$  – діюче значення струму первинної обмотки;

$S_{2i}$  – повна потужність вторинної обмотки;

$S_1$  – повна потужність первинної обмотки;

$S_{тр} = (\sum S_2 + S_1)/2$  – повна або габаритна потужність трансформатора;

$k_{тр} = P_0/S_{тр}$  – коефіцієнт використання трансформатора, де  $P_0$  – вихідна потужність випрямляча.

Параметри вентилів і трансформатора залежать від схеми випрямлення та режиму роботи випрямляча.

## 2. ВЕНТИЛІ ТА ЇХНІ ПАРАМЕТРИ

Електричні вентилялі можуть бути поділені на *некеровані* та *керовані*. В якості керованих вентилів застосовують тиристори.

В даний час у випрямлячах широкого поширення набули кремнієві напівпровідникові вентилялі. На рис. 1.2 наведена вольт-амперна характеристика (ВАХ) кремнієвого вентиляля.

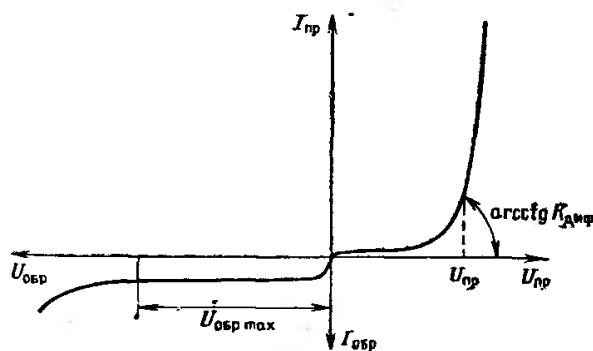


Рис 1.2 – Вольт-амперна характеристика некерованого вентиляля

Основними параметрами, що характеризують некеровані напівпровідникові вентилялі та обумовлені в ТУ на них, є граничні експлуатаційні дані (максимальні значення):

$I_{ср max}$  – найбільший допустимий середній струм у прямому напрямку або

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 6

$I_{пр max}$  – найбільший допустимий прямий струм, що визначає тепловий режим роботи вентиля, але слід мати на увазі, що нагрівання вентиля залежить від діючого значення струму, а співвідношення між діючим та середнім значеннями струму залежить від схеми випрямлення та характеру навантаження;

$U_{обр max}$  – найбільше значення напруги, яка може бути додана до вентиля у зворотному (непровідному) напрямку і яке вентиля може витримати, не наражаючись на небезпеку пробою;

$U_{пр max}$  – пряме падіння напруги, що визначається по ВАХ вентиля при максимальному постійному прямому струмі  $I_{пр max}$  і становить для різних типів кремнієвих діодів 0,6 ... 1,2 В (для германієвих 0,3 ... 0,5 В). Очевидно, що чим менше  $U_{пр max}$ , тим вище ККД;

$T_{п max}$  – гранична температура переходу;

$I_{обр max}$  – максимальне значення зворотного струму (струм через вентиля у зворотному (непровідному) напрямку при додатку до нього зворотної напруги);

$I_{и пр}$  – імпульсний прямий струм (найбільший допустимий короточасний струм протягом певного відрізка часу, що не порушує нормальної роботи вентиля);

$f_{пред}$  – гранична частота.

В окремих випадках наводяться допустима потужність розсіювання, час відновлення замикаючих властивостей вентиля, теплові опори перехід-корпус або перехід - довкілля.

При розрахунку пристроїв випрямлення необхідно знати диференціальний опір вентиля  $R_{диф}$ , який визначається за нахилом прямої вітки ВАХ діода.

В даний час знайшли широке застосування «лавинні» кремнієві вентиля. Дані вентиля здатні витримувати короточасні зворотні перенапруги, завдяки чому відпадає необхідність захисту від пробою. У випрямлячах знаходять

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 7

застосування також діодні зборки, діодні матриці і високовольтні стовпи, що є наборами з'єднаних між собою за певною схемою діодів.

При великих струмах навантаження іноді доводиться застосовувати паралельне включення вентилів, оскільки допустимі середні значення струму вентиля виявляються недостатніми.

При паралельному включенні вентилів через розбіжність їх ВАХ струми у них розподіляються нерівномірно (рис. 1.3).

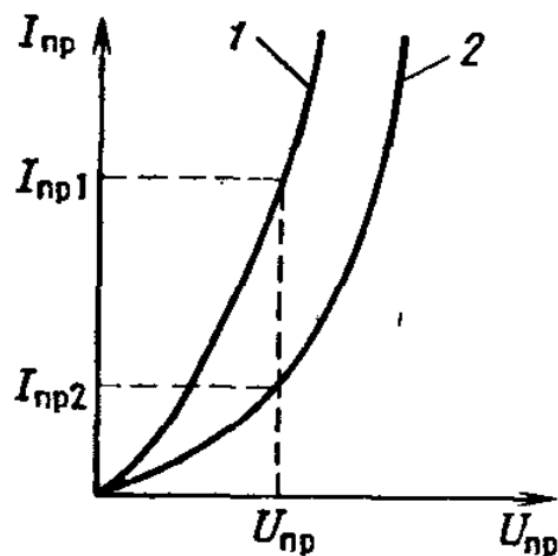


Рис. 1.3 – Вольт-амперні характеристики вентилів при паралельному включенні

Для вирівнювання струмів при паралельному включенні вентилів у випрямлячах застосовують спеціальні струмові вирівнювальні реактори.

При великих зворотних напругах, що діють у схемах випрямлення, застосовують послідовне включення вентилів. Через розбіжність зворотних віток ВАХ зворотні напруги на вентилях розподіляються нерівномірно.

Для вирівнювання напруги у випрямлячах застосовують: резисторні дільники (рис. 1.4,а); *RC*- (рис. 1.4,б) і *RCD*-кола (рис. 1.4,в).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 8

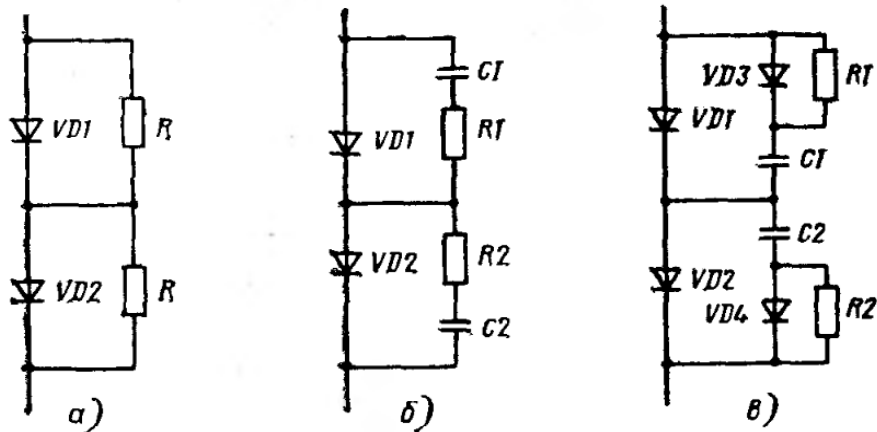


Рис. 1.4 – Схеми послідовного включення вентилів: а – з резистивним дільником; б – з  $RC$ -; в – з  $RCD$ -колом

### 3. СХЕМИ ВИПРЯМЛЕННЯ

На рис. 1.5 наведено найбільш поширені схеми випрямлення однофазної мережі змінного струму.

Однопівперіодна схема випрямлення (рис. 1.5,а) застосовується при роботі на навантаження з ємнісною реакцією для вихідних потужностей, що не перевищують 5...10 Вт. Перевагами схеми є: простота; мінімальна кількість елементів; невисока вартість; можливість роботи без трансформатора.

До недоліків схеми слід зарахувати: низьку частоту пульсації; висока зворотна напруга на вентилі; погане використання трансформатора; вимушене намагнічування сердечника трансформатора.

Двопівперіодна схема випрямлення з виведенням нульової точки (рис. 1.5,б) може працювати на будь-який вид навантаження. Знаходить широке застосування для отримання низьких вихідних напруг при великих струмах навантаження. Схема застосовується на вихідні потужності менше кількох сотень ват. Основні переваги схеми такі: частота пульсації вища, ніж в однопівперіодній схемі; мінімальна кількість вентилів; можливість використання вентилів із спільним катодом або спільним анодом; можливість використання спільного радіатора без ізоляції вентилів; відсутність вимушеного намагнічування; високий ККД. Недоліками схеми є: найгірше



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 9

використання трансформатора порівняно з мостовою і схемою подвоєння напруги; висока зворотна напруга.

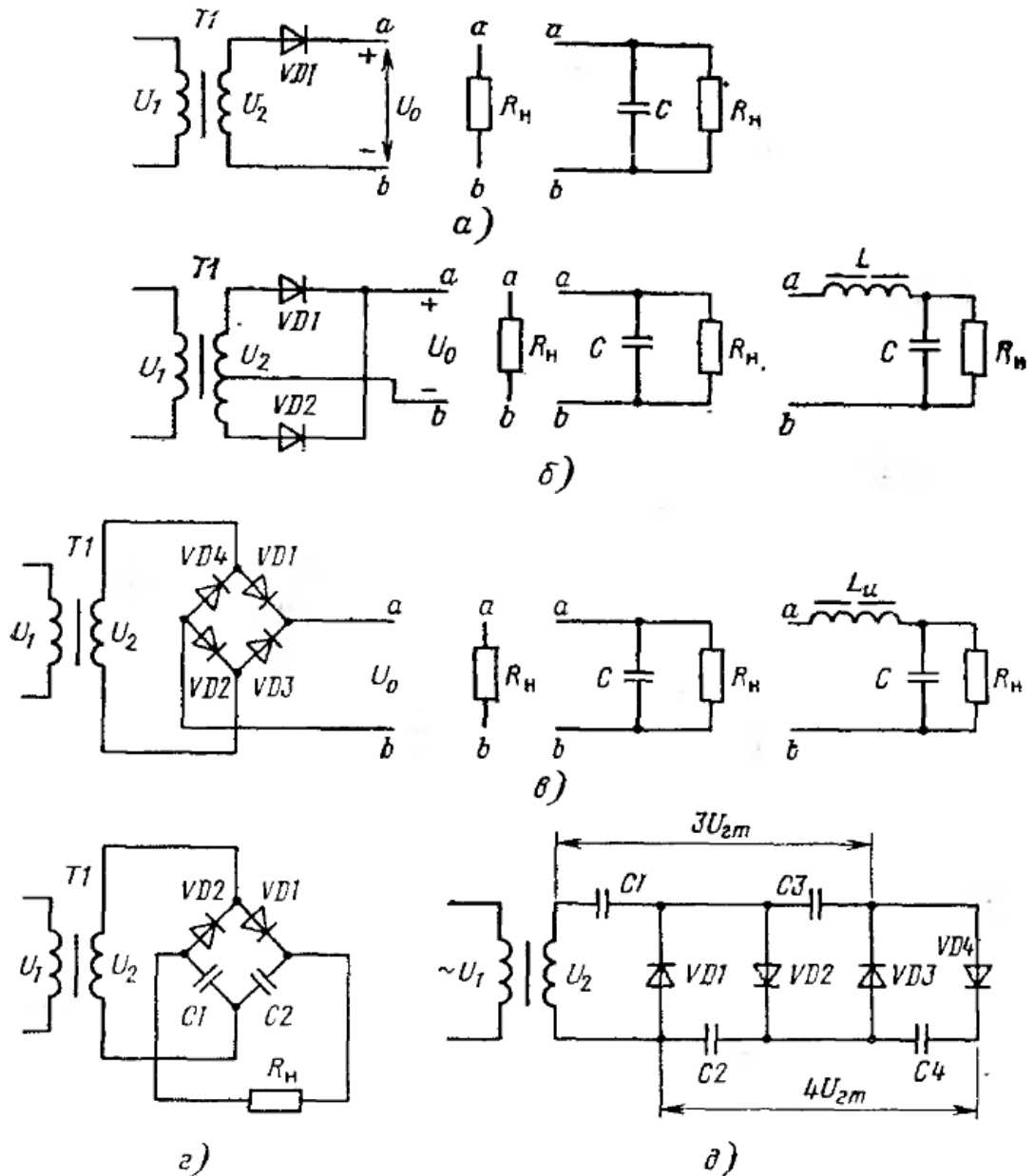


Рис.1.5 – Схеми випрямлення однофазної мережі змінного струму

Однофазна мостова схема випрямлення (рис. 1.5,в – схема Гретца) може працювати на будь-який вид навантаження. Переваги схеми: частота пульсації вища, ніж в однопівперіодній схемі; невелика зворотна напруга; гарне використання трансформатора; можливість роботи без трансформатора, безпосередньо від мережі; відсутність вимушеного намагнічування. До

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 10

недоліків схеми слід віднести: необхідність у чотирьох вентилях; підвищене падіння напруги у вентиляльному комплекті; неможливість встановлення однотипних напівпровідникових вентилів на одному радіаторі без ізолюючих прокладок.

Схема подвоєння напруги (рис. 1.5,г – схема Латура) застосовується при відносно високих напругах. Схема має наступні переваги: низька зворотна напруга; гарне використання трансформатора; можливість роботи без трансформатора. Недолік схеми – неможливість встановлення однотипних напівпровідникових вентилів на одному радіаторі без ізоляції.

Схема подвоєння напруги (схема Латура) є симетричною. Для отримання більш високої напруги (до кількох десятків кіловат) при струмах у частки міліампера застосовуються в основному несиметричні схеми множення, наприклад схема, що зображена на рис. 1.3,д. На всіх конденсаторах напруга дорівнює  $2U_{2m}$  (крім  $C1$ , напруга на якому  $U_{2m}$ ) і зворотна напруга на всіх діодах дорівнює  $2U_{2m}$ . Випрямлену напругу на навантаження можна знімати з послідовно включених конденсаторів  $C1$  і  $C3$  або  $C2$  і  $C4$ . У першому випадку отримаємо напругу на виході  $3U_{2m}$ , у другому —  $4U_{2m}$ . Збільшивши число ланок, можна на виході випрямляча отримати напругу  $nU_{2m}$ . На практиці застосовують схему множення до  $n=5\dots6$ . Перевагою несиметричних схем множення є можливість заземлення одного з виводів вторинної обмотки трансформатора, що часто потрібно при високих вихідних напругах. Недоліком цих схем є сильна залежність вихідної напруги при змінах струму навантаження і низька частота пульсації напруги, що дорівнює частоті струму мережі живлення. Схема подвоєння напруги та схеми множення напруги працюють на ємнісний характер навантаження, оскільки конденсатори є невід'ємною частиною випрямляча.

Оскільки характер навантаження суттєво впливає на роботу діодів випрямлення, різні форми струмів у фазі та їх тривалість призводять до того,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 11

що методи розрахунку та розрахункові співвідношення випрямлячів з різним характером навантаження значно різняться.

При розрахунку випрямляча, що працює на ємнісну реакцію навантаження, найбільш широко використовується графоаналітичний метод, що дозволяє визначити всі параметри випрямляча як функції кута відсікання або залежної від нього величини. Спрощуючими припущеннями цього метода такі:

1. Випрямлена напруга, що дорівнює напрузі на обкладках конденсатора ( $U_0 = U_c$ ), приймається незмінним у часі, що дозволяє виключити ємність із усіх розрахункових співвідношень. Це спрощення відповідає роботі випрямляча на джерело енергії з постійною ЕРС. Тому метод розрахунку може бути використаний при розрахунку випрямляча на проти-ЕРС.

2. Трансформатор має тільки активний опір  $r_{тр}$ , а індуктивний опір розсіювання дорівнює нулю. Індуктивний опір збільшує тривалість роботи фази та зменшує амплітуду струму вентиля. Оскільки на ємнісне навантаження практично працюють в основному випрямлячі малих потужностей, то індуктивні опори обмоток трансформаторів значно менше їх активних опорів і ними можна знехтувати.

3. Прямий опір вентиля  $r_{пр}$  приймається незмінним, а зворотний – нескінченно великим.

4. Крива напруги мережі живлення вважається неспотвореною синусоїдою, і всі елементи схеми випрямляча суворо симетричні.

Струм у вентилі протікає у частину періоду —  $-\theta/\omega \leq t \leq +\theta/\omega$ , коли напруга у фазі вторинної обмотки більше випрямленого  $u_2 > U_0$ , і дорівнює

$$i_a = \frac{(u_2 - U_0)}{r} = \frac{(U_m \cos \omega t - U_0)}{r}$$

де  $r = r_{пр} + r_{тр}$  – внутрішній опір випрямляча;  $r_{пр}$  – опір вентиля в прямому напрямку;  $r_{тр}$  – активний опір трансформатора.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 12

Оскільки при  $\omega t = \pm\theta$   $u_2 = U_0$ , то  $U_0 = U_m \cos\theta$  і струм через вентиль

$$i_a = \frac{(u_2 - U_0)}{r} = \frac{(U_m \cos\omega t - U_0)}{r} \quad (1.1)$$

Постійна складова струму навантаження

$$I_0 = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{U_m}{r} (\cos\omega t - \cos\theta) d\omega t = \frac{mU_0}{\pi r} (tg\theta - \theta) = \frac{mU_0}{\pi r} A, \quad (1.2)$$

де  $A$  – розрахунковий параметр. Він залежить від кута відсічення і визначається співвідношенням

$$A = \frac{I_0 \pi r}{mU_0}, \quad (1.3)$$

Значення  $U_0$  та  $I_0$  задаються на початку розрахунку,  $m$  визначається вибором схеми випрямлення. Орієнтовно  $r = r_{\text{пр}} + r_{\text{тр}}$  визначається опором вентиля у прямому напрямку

$$r_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр max}}} \quad (1.4)$$

і опір обмоток трансформатора

$$r_{\text{тр}} = k_r \frac{U_0}{I_0 f_c B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{s f_c B_m}{U_0 I_0}}, \quad (1.5)$$

де  $f_c$  – частота струму мережі живлення, Гц;  $s$  – кількість стержнів трансформатора, на якому розташовані його обмотки;  $B_m$  – амплітуда магнітної індукції, Тл;  $k_r$  – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Орієнтовні значення коефіцієнту  $k_r$

Схема випрямлення	Однопівперіодна	Двопівперіодна	Однофазна мостова (схема Гретца)	Подвоєння напруги (схема Латура)
$k_r$	2,3	4,7	3,5	0,9

Всі величини, що характеризують роботу випрямляча (діючі значення напруги та струму вторинної обмотки  $U_2$ ,  $I_2$ , діюче значення струму первинної обмотки  $I_1$ , габаритна потужність трансформатора  $S_{\text{тр}}$ , середнє, діюче та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 13

амплітудне значення струму вентиля  $I_{пр\ ср}$ ,  $I_{пр}$ ,  $I_{пр\ т}$ , зворотна напруга на ньому  $U_{обр}$ , пульсація випрямленої напруги  $k_{п1}$  і зовнішня характеристика випрямляча), залежать від кута відсікання  $\theta$ , тому вони також залежать від розрахункового параметра  $A$ , що є функцією кута відсікання  $\theta$ .

При розрахунку випрямляча, що працює на ємність, всі вище зазначені величини визначаються графоаналітичним способом.

Розраховані величини ( $U_2$ ,  $I_2$ ,  $I_1$ ,  $S_{тр}$ ,  $I_{пр\ ср}$ ,  $I_{пр}$ ,  $I_{пр\ т}$ ,  $U_{обр}$ ,  $k_{п1}$ ) пов'язані з вихідними ( $U_0, I_0, t$ ) через коефіцієнти ( $B, D, F, H$ ), які, своєю чергою, є функціями кута відсічки  $\theta$ , отже, і параметра  $A$ . На рис. 1.6-1.8 наведені залежності різних коефіцієнтів від параметра  $A$ . У табл. 1.2 основні розрахункові співвідношення визначення параметрів схем на рис. 1.5.

Таблиця 1.2 – Основні параметри схем випрямлення з активно-ємністним навантаженням

Схема	Однопівперіодна	Двопівперіодна	Мостова (схема Гретця)	Подвоєння (схема Латура)
$\frac{U_2}{U_0}$	$B$	$B$	$B$	$0,5B$
$\frac{U_{обр}}{U_0}$	$2,82 \cdot B$	$2,82 \cdot B$	$1,41B$	$1,41B$
$\frac{I_{пр\ ср}}{I_0}$	$1$	$0,5$	$0,5$	$1$
$\frac{I_{пр\ т}}{I_0}$	$F$	$0,5F$	$0,5F$	$F$
$\frac{I_{пр}}{I_0}$	$D$	$0,5D$	$D$	$D$
$\frac{I_2}{I_0}$	$D$	$0,5D$	$0,707D$	$1,41D$
$\frac{I_1 w_1}{I_0 w_2}$	$\sqrt{D^2 - 1}$	$0,707D$	$0,707D$	$1,41D$
$\frac{S_2}{P_0}$	$BD$	$BD$	$0,707BD$	$0,7BD$
$\frac{S_1}{P_0}$	$B\sqrt{D^2 - 1}$	$0,707BD$	$0,707BD$	$0,7BD$
$\frac{S_{мп}}{P_0}$	$0,5BD + \sqrt{D^2 - 1}$	$0,85BD$	$0,707BD$	$0,7BD$

$k_{n1}$	$H/rC$	$H/rC$	$H/rC$	$H/rC$
$\frac{f_{n1}}{f_c}$	1	2	2	2
$r$	$r_{npD} + r_{mp}$	$r_{npD} + r_{mp}$	$2r_{npD} + r_{mp}$	$r_{npD} + r_{mp}$

Коефіцієнт пульсації за першою гармонійною складовою

$$k_{n1} = \frac{H}{rC}. \quad (1.6)$$

У (1.6) залежить від кута  $\theta$ , отже, від параметра  $A$ . Залежності  $H = f(A)$  щодо різних значень  $m$  показані на рис. 1.9-1.10.

При розрахунку випрямляча значення коефіцієнта пульсації іноді задається. Визначивши за графіками  $H$  можна знайти ємність конденсатора, необхідну для отримання заданого коефіцієнта пульсації:

$$C = \frac{H}{rk_{n1}}. \quad (1.7)$$

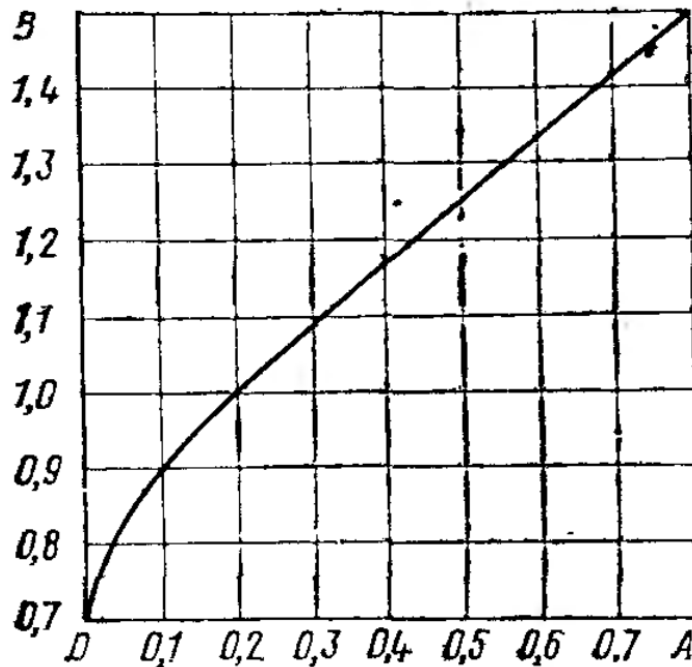


Рис.1.6 – Залежність параметрів  $B$  від  $A$

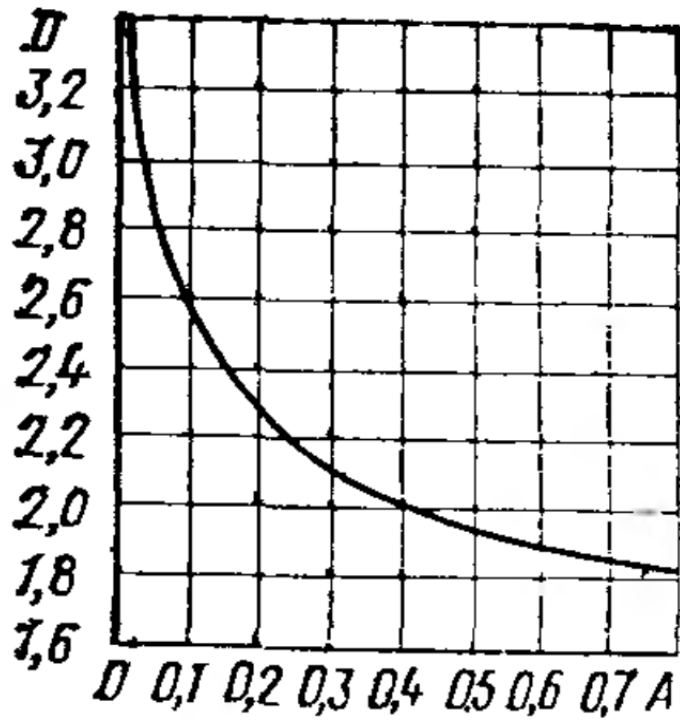


Рис.1.7 – Залежність параметрів  $D$  від  $A$

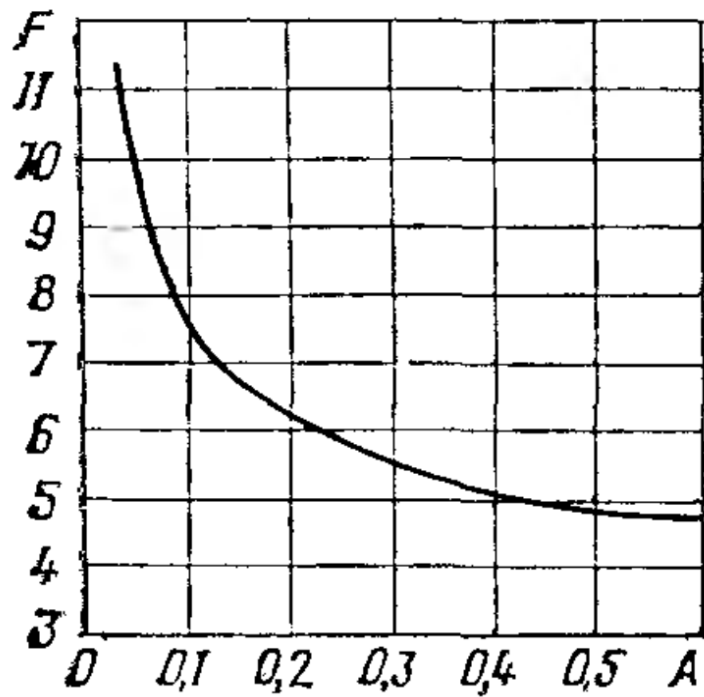


Рис.1.8 – Залежність параметрів  $F$  від  $A$

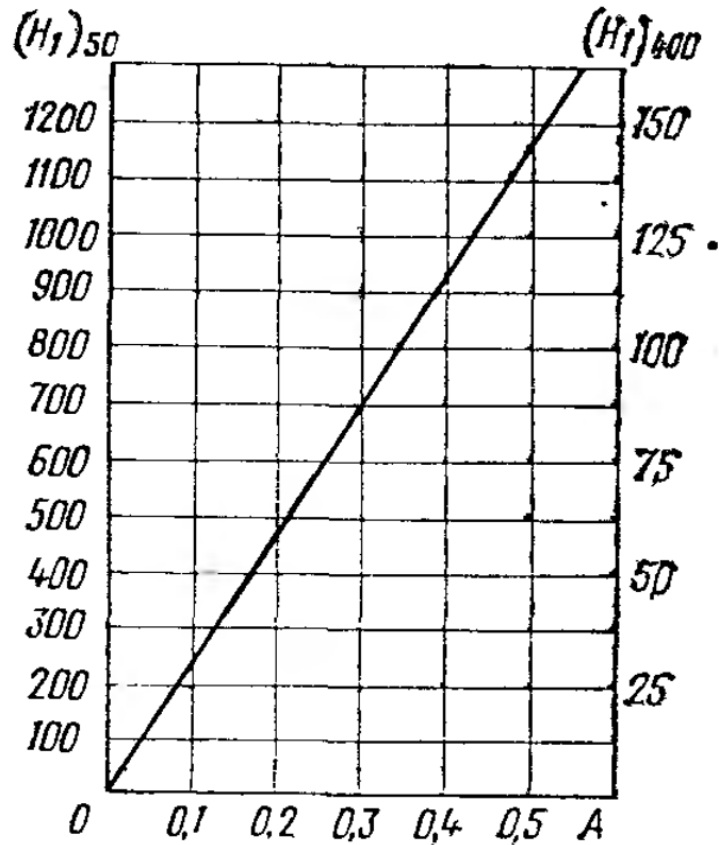


Рис. 1.9 – Залежність параметрів  $H$  від  $A$  для  $m = 1$

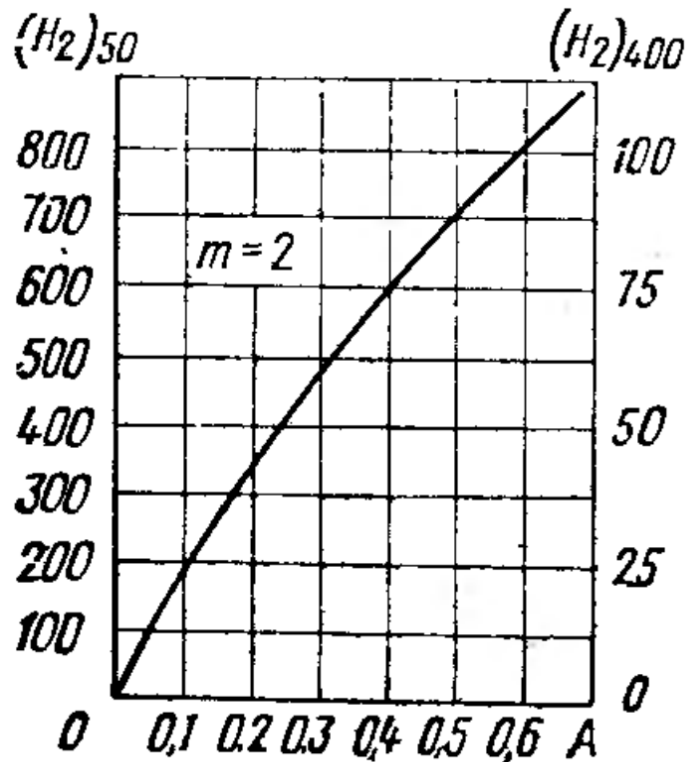


Рис. 1.10 – Залежність параметрів  $H$  від  $A$  для  $m = 2$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 17

Зовнішня характеристика випрямляча  $U_0 = f(I_0)$  при  $U_1 = const$  дозволяє визначити: зміну випрямленої напруги  $\Delta U_0$ , що викликана зміною струму навантаження; напругу холостого ходу  $U_{0xx}$ , струм короткого замикання  $I_{0кз}$  і внутрішній опір випрямляча  $r_0$ . Оскільки  $U_0/U_{2m} = \cos\theta$  і

$$\frac{I_0}{\frac{mU_{2m}}{r}} = \frac{A\cos\theta}{\pi} = \gamma_0,$$

то залежність  $\cos\theta = f(\gamma_0)$  у певному масштабі є зовнішню характеристику випрямляча. На рис. 1.11 наведено узагальнену зовнішню характеристику випрямлячів.

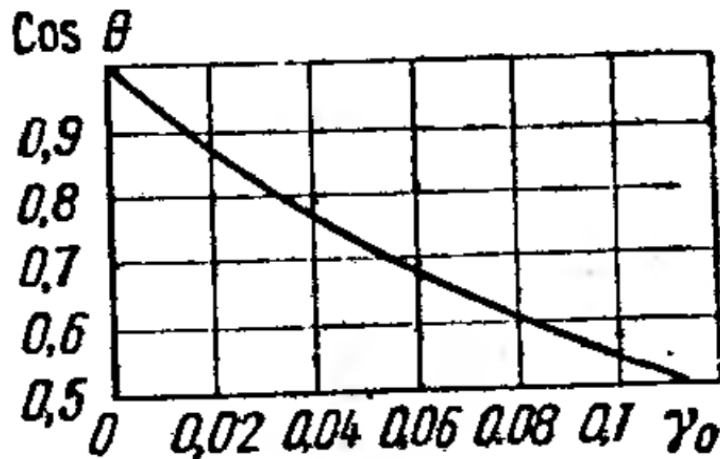


Рис. 1.11 – Узагальнена зовнішня характеристика випрямлячів з ємністю

Для побудови реальної зовнішньої характеристики ординати кривої необхідно на рис. 1.11 помножити на  $U_{2m}$ , а її абсциси на  $mU_{2m}/r$ .

При холостому ході  $I_0 = 0$  і  $U_{0xx} = U_{2m}$ , при короткому замиканні  $U_0 = 0$  і  $I_{0кз} = mU_{2m}/r$ . Зміна випрямленої напруги при зміні струму навантаження від нуля до номінального  $\Delta U_0 = U_{0xx} - U_0$ , внутрішній опір випрямляча

$$r_0 \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}. \quad (1.8)$$

Коефіцієнт корисної дії випрямляча

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 18

$$\eta = \frac{P_0}{(P_0 + P_{\text{тр}} + P_{VD})} \quad (1.9)$$

де  $P_{\text{тр}} = S_{\text{тр}} (1 - \eta_{\text{тр}}) / \eta_{\text{тр}}$  – втрати в трансформаторі;  $P_{VD}$  – втрати у вентилях. Втрати у вентилях дорівнюють  $P_{VD} = I_{\text{пр ср}} U_{\text{пр}} N$ , де  $N$  – число вентилів у схемі випрямлення.

### Практичне завдання

Розрахувати елементи схеми однофазного випрямляча з фільтром, що працює від мережі живлення з напругою  $U_1 = 220$  В і частотою  $f_c = 50$  Гц, що забезпечує випрямлену напругу  $U_0$ , випрямлений струм  $I_0$ , коефіцієнт пульсацій на виході схеми  $k_{\text{п1}}$ . Вихідні дані наведено у табл. 1.3-1.4.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до завдання

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_0$ , В	3	5	6	9	12	15	24	27	36	48
$I_0$ , А	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до завдання

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{п1}}$ , %	0,5	0,8	1,0	0,1	2,0	2,5	1,5	3,0	0,7	0,9
Тип схеми (рис.1.5)	а	б	в	г	а	б	в	г	а	б

### Методичні рекомендації до розв'язування практичної задачі РОЗРАХУНОК СХЕМИ ВИПРЯМЛЕННЯ З АКТИВНО- ЄМНІСТНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

При розрахунку схем випрямлення заданими величинами є:

$U_0$  – номінальна випрямлена напруга;

$I_{0\text{max}}$  – максимальний струм навантаження;

$I_{0\text{min}}$  – мінімальний струм навантаження;

$P_0$  – потужність  $P_0 = U_0 I_0$ ;

$U_1$  – номінальна напруга мережі;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 19

$a_{max}, a_{min}$  – відносні відхилення напруги мережі у бік підвищення та зниження;

$f_c$  – частота струму мережі;

$k_{п1}$  – коефіцієнт пульсації.

1. Вибираємо схему випрямлення та визначаємо  $m$  на підставі рекомендацій п. 2.3.

2. Орієнтовно визначаємо параметри вентилів  $U_{обр}$ ,  $I_{пр.ср}$ ,  $I_{пр}$ , і також габаритну потужність трансформатора  $S_{тр}$  за даними табл. 1.2.

Для орієнтовного визначення параметрів необхідно задати значення коефіцієнтів  $B$  і  $D$ , наближені значення яких наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Орієнтовні значення коефіцієнтів  $B$  і  $D$

$m$	$B$	$D$
1	0,95...1,1	2,05...2,1
2	0,85...1,1	2,1...2,2
3	0,81...0,85	2,2...2,36
6	0,78...0,81	2,36...2,7

Зворотна напруга  $U_{обр}$  визначається за максимальним значенням випрямленої напруги

$$U_{0max} = U_0(1 + a_{max}).$$

Вибираємо вентиль із рекомендованої літератури.

Вентиль повинен бути обраний так, щоб максимальна зворотна напруга була більшою, ніж у схемі випрямлення:  $U_{обр max} > U_{обр}$ . Струм  $I_{пр.ср}$  повинен бути менше струму  $I_{пр.ср max}$ , а струм  $I_{пр}$  менше  $1,57I_{пр.ср max}$ .

Визначаємо опір вентиля у прямому напрямку

$$r_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр.max}} \quad (1.10)$$

3. Визначаємо орієнтовно опір обмоток трансформатора  $r_{тр}$  за (1.5) і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 20

табл.1.1.

4. Визначаємо активний опір фази:

$$r = r_{mp} + r_{npN},$$

де  $N$  – кількість діодів, включених послідовно.

5. Визначаємо розрахунковий параметр  $A$  за (1.3). Для схеми подвоєння і однопівперіодної схеми  $m = 1$ ; двопівперіодної схеми і однофазної мостова  $m = 2$ . При визначенні  $A$  для схеми подвоєння в виразі замість  $U_0$  необхідно підставити  $U_0/2$ .

6. Визначивши  $A$ , із графіків на рис. 1.6-1.8 знайдемо коефіцієнти  $B, D, F$ . Знаходимо  $U_2, I_2, S_2, I_1, S_1, S_{mp}, U_{обр}, I_{np\ cр}, I_{np}, I_{np\ max}$  за допомогою табл. 1.2. Зворотна напруга визначається за максимальним значенням випрямленої напруги  $U_{0max} = U_0(1 + a_{min})$ . Перевіряємо, чи проходять вибрані вентиля за значеннями  $U_{обр}, I_{np}$ .

7. Будуємо зовнішню характеристику випрямляча, помножуючи ординати кривої на рис. 1.11 на  $U_{2m} = U_2\sqrt{2}$  та її абсциси на

$$\frac{mU_{2m}}{r} = \frac{mU_2\sqrt{2}}{r} = I_{0кз}.$$

Визначаємо напругу холостого ходу  $U_{0хх}$ , струм короткого замикання  $I_{0кз}$ . З (1.10) визначаємо внутрішній опір випрямляча  $r_0$ .

Визначаємо максимальну випрямлену напругу при максимальній напрузі мережі

$$U_{0ххmax} = U_{0хх}(1 + a_{max}) \quad (1.11)$$

8. Визначаємо коефіцієнт  $H$  із графіків на рис. 1.9-1.10. З (1.7) за відомими  $k_{п1}$  і  $H$  визначаємо ємність  $C$ . Амплітуда першої гармоніки змінної складової випрямленої напруги  $U_{0m1} = U_0H/rC$ . Конденсатор вибираємо за відомою ємністю, максимальною напругою  $U_{0ххmax}$  і допустимим значенням змінної

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 21

складової випрямленої напруги.

9. Коефіцієнт корисної дії випрямляча визначаємо з (1.9).

### ПРИКЛАД

Розрахувати схему випрямлення за такими даними:

номінальна випрямлена напруга –  $U_0 = 30$  В;

номінальний випрямлений струм –  $I_0 = 0,7$  А;

мінімальний струм навантаження –  $I_{0min} = 0$ ;

потужність –  $P_0 = U_0 I_0 = 21$  Вт;

мережа – однофазна;

номінальна напруга мережі –  $U_1 = 220$  В;

відносні відхилення напруги мережі –  $a_{max} = a_{min} = 0,1$ ;

частота струму мережі –  $f_c = 50$  Гц;

коефіцієнт пульсації –  $k_{п1} = 0,05$ .

1. Вибираємо двопівперіодну схему випрямлення із середньою точкою вторинної обмотки трансформатора ( $m = 2$ ).

2. Визначаємо орієнтовні значення коефіцієнтів  $B$  і  $D$  за табл. 1.5 для  $m = 2$ :  $B = 1$ ;  $D = 2,2$ .

Максимальна випрямлена напруга:

$$U_{0max} = U_0(1 + a_{max}) = 30(1 + 0,1) = 33 \text{ В.} \quad (1)$$

Орієнтовно визначаємо параметри вентилів за табл. 1.2:

$$U_{обр} = U_{0max} \cdot 2,82 \cdot B = 33 \cdot 2,82 \cdot 1 = 93,06 \text{ В.} \quad (2)$$

$$I_{нр\ ср} = 0,5 \cdot I_0 = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35 \text{ А} \quad (3)$$

$$I_{нр} = 0,5 \cdot D \cdot I_0 = 0,5 \cdot 2,2 \cdot 0,7 = 0,77 \text{ А} \quad (4)$$

$$S_{тп} = 0,85 \cdot B \cdot D \cdot P_0 = 0,85 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 21 = 39,27 \text{ Вт.} \quad (5)$$

За обчисленими значеннями  $U_{обр}$ ;  $I_{нр\ ср}$  з довідникової літератури в якості вентилів вибираємо кремнієві діоди типу Д229И, у яких  $U_{обр\ max} = 200$  В;  $I_{нр\ ср\ max} = 0,7$  А;  $1,57I_{нр\ ср\ max} = 1,1$  А > 0,77 А.;  $U_{нр\ ср} = 1$  В.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 22

Визначаємо за виразом (1.10) опір вентиля у прямому напрямку:

$$r_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр.max}}} = \frac{1}{0,7} = 1,4 \text{ Ом.} \quad (6)$$

3. Визначаємо за виразом (1.5) та табл.1.1 опір обмоток трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = k_r \frac{U_0}{I_0 f_c B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{s f_c B_m}{U_0 I_0}} = 4,7 \frac{30}{0,7 \cdot 50 \cdot 1,25} \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,25}{30 \cdot 0,7}} = 4,22 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Де  $k_r = 4,7$ ;  $B_m = 1,25$  Тл;  $s = 1$  (магнітопровід броньової).

4. Визначаємо активний опір фази:

$$r = r_{\text{мп}} + r_{\text{нр}} = 4,22 + 1,4 = 5,62 \text{ Ом,} \quad (8)$$

5. Визначимо коефіцієнт А за виразом (1.3):

$$A = \frac{I_0 \pi r}{m U_0} = \frac{0,7 \cdot 3,14 \cdot 5,62}{2 \cdot 30} = 0,2. \quad (9)$$

6. Визначимо коефіцієнти за рис. 1.6-1.8:  $B = 1,0$ ;  $D = 2,25$ ;  $F = 6,3$ .

Визначимо параметри трансформатора та вентилів:

$$U_2 = U_0 \cdot B = 30 \cdot 1 = 30 \text{ В;} \quad (10)$$

$$I_2 = 0,5 \cdot D \cdot I_0 = 0,5 \cdot 2,25 \cdot 0,7 = 0,79 \text{ А;} \quad (11)$$

$$U_1 = 220 \text{ В;} \quad (12)$$

$$I_1 = \frac{0,707 D I_0 w_2}{w_1} = \frac{0,707 D I_0 U_2}{U_1} = \frac{0,707 \cdot 2,25 \cdot 0,7 \cdot 30}{220} = 0,15 \text{ А;} \quad (13)$$

$$S_2 = B \cdot D \cdot P_0 = 1 \cdot 2,25 \cdot 21 = 47,25 \text{ Вт;} \quad (14)$$

$$S_1 = 0,707 \cdot B \cdot D \cdot P_0 = 0,707 \cdot 1 \cdot 2,25 \cdot 21 = 33,4 \text{ Вт;} \quad (15)$$

$$S_{\text{мп}} = 0,85 \cdot B \cdot D \cdot P_0 = 0,85 \cdot 1 \cdot 2,25 \cdot 21 = 40,16 \text{ Вт;} \quad (16)$$

$$I_{\text{нр ср}} = 0,5 \cdot I_0 = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35 \text{ А;} \quad (17)$$

$$I_{\text{нр}} = 0,5 \cdot D \cdot I_0 = 0,5 \cdot 2,25 \cdot 0,7 = 0,79 \text{ А;} \quad (18)$$

$$I_{\text{нр}} = 0,79 \text{ А} < 1,57 I_{\text{нр ср max}} = 1,1 \text{ А;} \quad (19)$$

$$I_{\text{нр max}} = 0,5 \cdot F \cdot I_0 = 0,5 \cdot 6,3 \cdot 0,7 = 2,2 \text{ А} \quad (20)$$

$$U_{\text{обр}} = 2,82 \cdot B \cdot U_{0\text{max}} = 2,82 \cdot 1 \cdot 33 = 93,06 \text{ В} < 200 \text{ В.} \quad (21)$$

Отже, попередньо обрані діоди придатні для роботи в схемі випрямлення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 23

7. Визначимо  $U_{2m}$  і  $I_{0кз}$  які дозволять побудувати зовнішню характеристику схеми випрямлення з ємністю:

$$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \sqrt{2} \cdot 30 = 42,43 \text{ В}; \quad (22)$$

$$I_{0кз} = \frac{mU_{2m}}{r} = \frac{2 \cdot 42,43}{5,62} = 15,1 \text{ А}. \quad (23)$$

Зовнішню характеристику схеми випрямлення зображено на рис. 1.

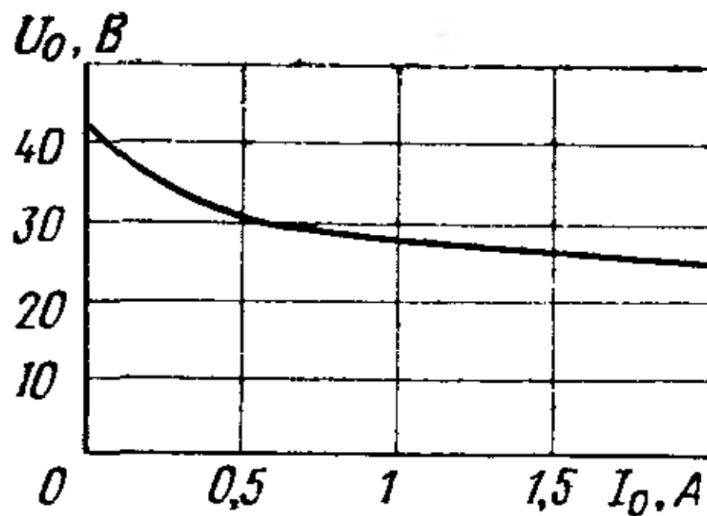


Рис 1 – Зовнішня характеристика схеми випрямлення

Визначимо максимальну напругу холостого ходу:

$$U_{0ххmax} = U_{0хх}(1 + a_{max}) = 42,43 \cdot (1 + 0,1) = 46,67 \text{ В}. \quad (24)$$

За виразом (1.8) визначаємо внутрішній опір випрямляча:

$$r_0 \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} = \frac{U_{0хх} - U_0}{I_0} = \frac{46,67 - 30}{0,7} = 23,81 \text{ Ом}. \quad (25)$$

8. За значенням  $A = 0,2$  з допомогою рис. 1.10 визначаємо  $H = 350$ . За виразом (1.7) знаходимо ємність, необхідну для забезпечення заданого коефіцієнта пульсації  $k_{n1}$ :

$$C = \frac{H}{rk_{n1}} = \frac{350}{5,62 \cdot 0,05} = 1245,55 \text{ мкФ}. \quad (26)$$

Амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги:

$$U_{m1} = U_0 \frac{H}{rC} = \frac{30 \cdot 350}{5,62 \cdot 1245,55} = 1,5 \text{ В}. \quad (27)$$

Вибираємо із довідникової літератури конденсатори типу К50-3Б на

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/172.00.2/Б/ОК22- 2024
	Екземпляр № 1	Арк 24 / 24

номінальну напругу 100 В, номінальна ємність конденсатора 200 мкФ. Для забезпечення заданого коефіцієнта пульсації включаємо паралельно сім конденсаторів сумарної ємності  $C = 7 \cdot 200 = 1400$  мкФ. Коефіцієнт пульсації напруги:

$$k_{n1} = \frac{H}{rC} = \frac{350}{5,62 \cdot 1400} = 0,0445, \quad (28)$$

менше заданого.