

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні
вимірювання та їх стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 21 - Випрямлячі. Стабілізатори

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Загальні відомості та класифікація випрямлячів.
2. Експлуатаційні параметри і характеристики випрямлячів.
3. Робота однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом на активне навантаження.
4. Робота однофазного мостового випрямляча на активне навантаження.
6. Згладжуючі фільтри.
7. Стабілізатори напруги.
8. Стабілізатори струму.

**Рекомендована література (основна, допоміжна),
інформаційні ресурси в Інтернеті**

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво “Політехніка”, 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво “Бескид Бит”, 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Загальні відомості та класифікація випрямлячів

Випрямлячі - це електротехнічні пристрої, призначені для перетворення енергії джерела напруги змінного струму в енергію напруги постійного струму.

Склад випрямляча показано на узагальненій структурній схемі, наведеній на рис. 1.

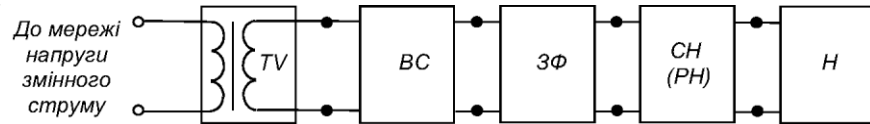


Рисунок 1 – Структурна схема випрямляча:

TV- трансформатор напруги; BC - вентильна схема; ЗФ - згладжуючий фільтр; CH (PH) - стабілізатор напруги (регулятор напруги); Н - навантаження

Як правило, випрямляч підмикається до розподільної мережі напруги змінного струму.

Трансформатор призначений для перетворення величини напруги мережі до значення, необхідного для роботи випрямляча. Він також забезпечує електричну (гальванічну) розв'язку мережі і навантаження.

Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену - пульсуючу однополярну. Вона, як правило, виконується на напівпровідникових ключах.

Згладжуючий фільтр перетворює випрямлену напругу у постійну. Фільтри виконуються на реактивних елементах, що мають властивість накопичувати електричну або електромагнітну енергію: конденсаторах, дроселях. Такі фільтри називаються пасивними.

Для живлення радіоелектронних пристроїв часто використовують активні фільтри, що будуються на транзисторах, операційних підсилювачах та реактивних елементах.

Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні при змінах напруги мережі або навантаження у заданих межах.

При необхідності регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах використовують регулятори напруги.

Крім вказаних вузлів, випрямляч може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі та ін..

Випрямлячі класифікують за числом фаз - однофазні та багатофазні (останні - найчастіше трифазні). За потужністю випрямлячі бувають малої потужності (до 100 Вт), середньої (до 10 кВт) і великої (понад 10 кВт).

Є некеровані випрямлячі та керовані. Перші будуються на некерованих вентилях - на діодах, другі - на керованих - наприклад, на тиристорах.

За принципом дії випрямлячі поділяються на однокітні та двокітні.

Однокітними називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм протікає один раз за період напруги мережі і лише у одному напрямку.

Важливим параметром випрямляча є кратність пульсацій випрямленої напруги m - відношення частоти пульсацій випрямленої напруги до частоти мережі. У однофазних випрямлячів він відповідає числу фаз мережі.

Двотактними (двопівперіодними) називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм за період напруги мережі протікає двічі і у різних напрямках. Кратність пульсацій у двотактних випрямлячів дорівнює подвоєному числу фаз.

Найважливішим вузлом випрямляча є вентильна схема - схема випрямлення.

Найширшого розповсюдження набули схеми випрямлячів, зображені на рис. 2 (виходячи з того, що як вентилі тут використано діоди - маємо некеровані випрямлячі).

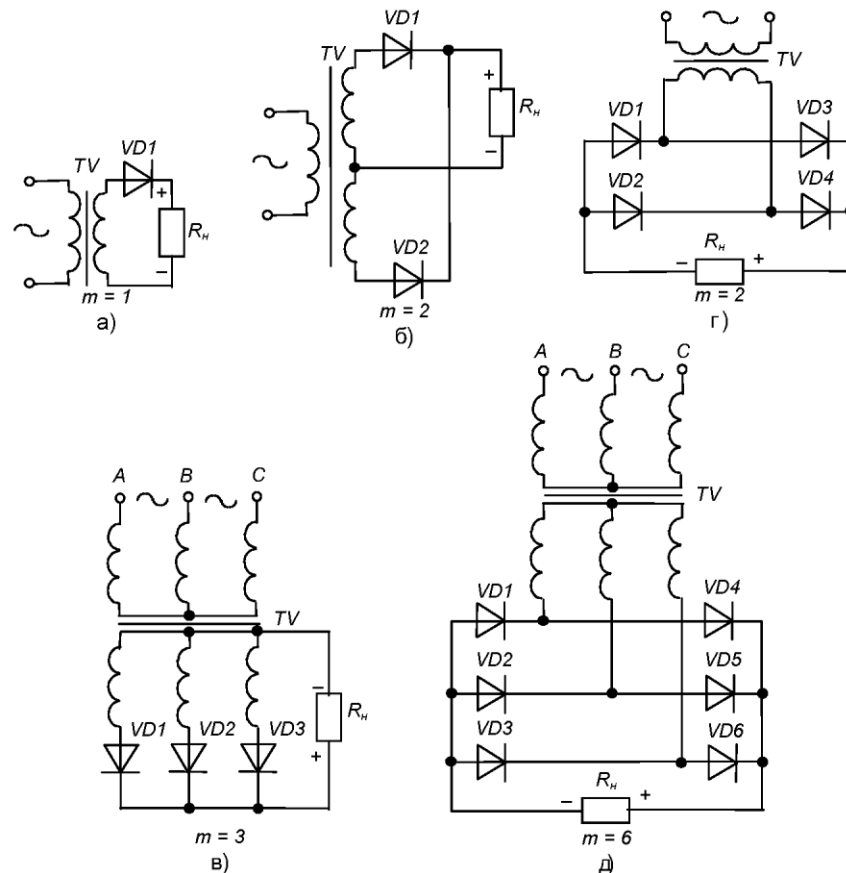


Рисунок 2 – Випрямлячі: а-в - однофазні (з нульовим виводом); г, д - двотактні (мостові); а) однофазна однопівперіодна; б) однофазна двопівперіодна з нульовим виводом; в) трифазна з нульовим виводом (схема Міткевича); г) однофазна мостова; д) трифазна мостова (схема Ларіонова)

2. Експлуатаційні параметри і характеристики випрямлячів

1) Основні експлуатаційні параметри випрямляча - це середня напруга на його навантаженні U_d (див. рис. 13.3) та середній струм навантаження I_d .

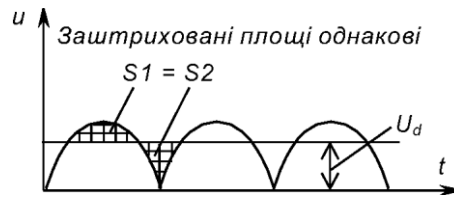


Рисунок 3 – Ілюстрація середнього значення випрямленої напруги
Тоді опір навантаження становить

$$R_n = \frac{U_d}{I_d},$$

а його потужність $P_d = U_d I_d$.

- 2) Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $K_n = \frac{U_{m(1)}}{U_d}$,
де $U_{m(1)}$ - амплітудне значення основної гармоніки випрямленої напруги при розвиненні останньої у ряд Фур'є.
- 3) Зовнішня (навантажувальна) характеристика $U_d = f(I_d)$.
- 4) Регульовальна характеристика $U_d = f(\alpha)$, де α - кут керування тиристорів (лише для керованих випрямлячів).
- 5) Середнє значення струму через вентиль I_a .
- 6) Амплітудне значення струму через вентиль I_m .
- 7) Амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається до вентилів $U_{вт}$.
- 8) Коефіцієнт корисної дії η .
- 9) Надійність.

Знаючи експлуатаційні характеристики різних схем випрямлячів і вимоги з боку навантаження, обирають конкретну схему. На основі параметрів 5-7 вибирають вентилі.

Розрізняють такі режими роботи випрямлячів:

- 1) на активне навантаження (R);
- 2) на активно-індуктивне навантаження (RL);
- 3) на активно-ємнісне навантаження (RC);
- 4) на протиелектрорушійну силу - проти-е.р.с. (Е) - наприклад, коли випрямляч використовують для заряду акумуляторної батареї.

Як видно з рис. 2, найпростішим є однопівперіодний випрямляч. Показники якості вихідної напруги та інші у цього випрямляча вкрай низькі.

3. Робота однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом на активне навантаження

Схема однофазного випрямляча з нульовим виводом зображена на рис. 4.

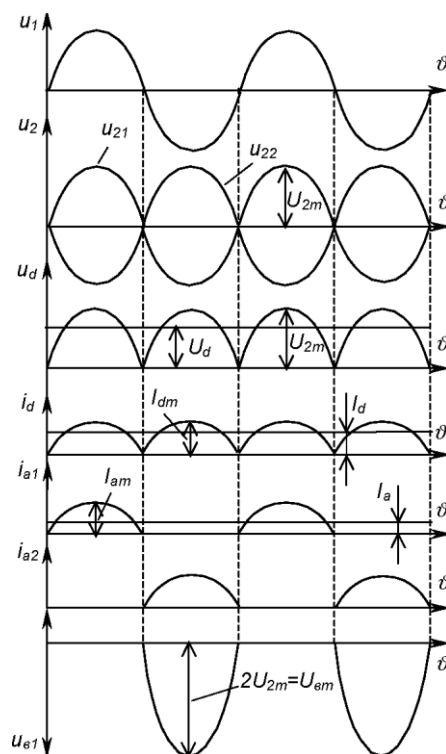
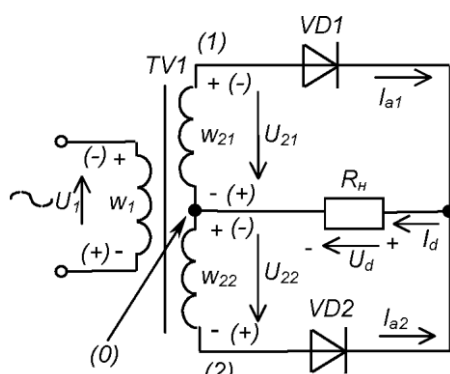


Рисунок 4 - Однофазний випрямляч з нульовим виводом та часові діаграми роботи

Очевидно, що він являє собою два однопівперіодних випрямлячі, підімкнені до навантаження паралельно. Вторинна обмотка його трансформатора має вивід від її середини - нульовий вивід (0). Тобто вона складається з двох півобмоток, кількості витків яких однакові: $w_{21} = w_{22} = w_2$. Тоді напруги, що в них трансформуються, відносно нульової точки також однакові:

$$|u_{21}| = |u_{22}|,$$

але протилежні за фазою.

Коефіцієнт трансформації трансформатора становить $n = w_1 / w_2$, де w_1 , w_2 - кількість витків первинної та половини вторинної обмоток відповідно.

Схема працює так.

За позитивної полярності напруги на обмотці w (на рис. 4 вказана без дужок) у провідному стані знаходиться діод VD1 і через нього тече струм

$i_{a1} = \frac{u_{21}}{R_H}$ (прямим спадом напруги на діоді нехтуємо - вважаємо його за ідеальний).

На навантаженні з'являється позитивна півхвиля напруги. Діод VD2 при цьому закритий зворотною напругою $u_{зв} = 2u_2$ ($|u_2| = |u_{21}| = |u_{22}|$) - зі схеми видно, що при цьому анодом він підімкнений до точки (2), а катодом через діод VD1 (замкнений ключ) до точки (1).

За негативної півхвилі напруги (на рис. 4 - у дужках) у провідному стані знаходиться діод VD2. Через нього тече струм $i_{a2} = \frac{u_{22}}{R_H}$, діод VD1 закритий подвійною зворотною напругою $2u_2$.

Таким чином, за час періоду напруги мережі струм через навантаження

протікає у одному напрямку і безперервно. Досягається це в два прийоми, у один з яких навантаження першим діодним ключем підмикається до першої півобмотки трансформатора, у другий - другим діодним ключем до другої півобмотки.

4. Робота однофазного мостового випрямляча на активне навантаження

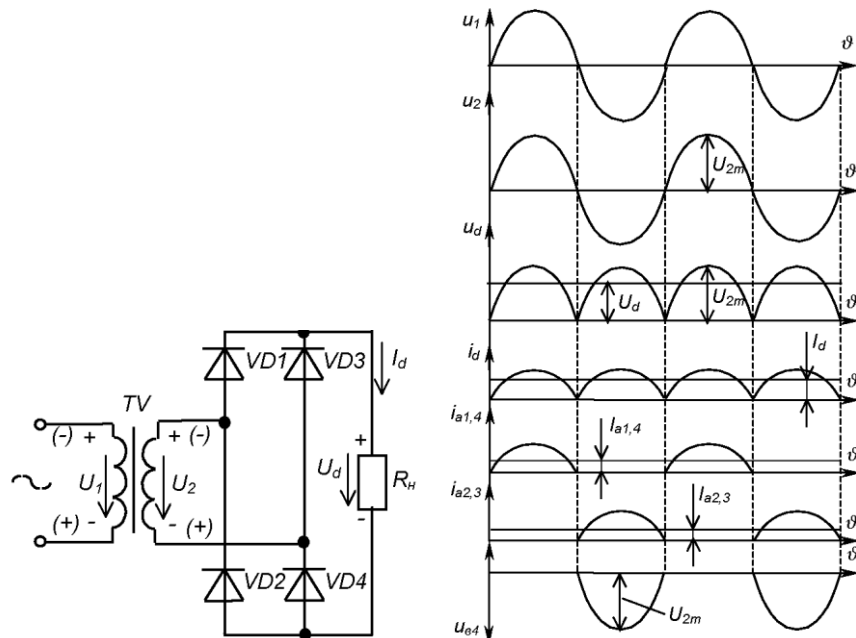


Рисунок 5 – Однофазний мостовий випрямляч та часові діаграми роботи

Мостовий однофазний випрямляч (запропонований Грецем) складається з трансформатора, що має одну вторинну обмотку, та чотирьох випрямних діодів, з'єднаних у мостову схему. Схема випрямляча зображена на рис. 13.5.

Діоди VD1, VD3 складають катодну групу, VD2, VD4 - анодну (за назвою з'єднаних між собою електродів). При цьому у одну діагональ моста (діагональ постійного струму) увімкнене навантаження, а до другої діагоналі (діагоналі змінного струму) підімкнена вторинна обмотка трансформатора.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди - один із анодної і один із катодної груп.

За полярності, вказаної без дужок, це діоди VD1, VD4, а діоди VD2, VD3 при цьому закриті. За полярності, вказаної у дужках - навпаки. Через навантаження струм завжди тече у одному напрямку.

Аналізуючи схеми обох вищерозглянутих випрямлячів, можна зазначити деякі переваги мостового випрямляча, порівняно з випрямлячем з нульовим виводом. Зокрема те, що за однакових U_d зворотна максимальна напруга на діоді у два рази нижча, краще використовується трансформатор, простіша його конструкція.

6. Згладжуючі фільтри

Згладжуючі фільтри використовуються для зниження рівня пульсації випрямленої напруги до такого, що забезпечує нормальну роботу

навантаження.

Найширше використання мають пасивні згладжуючі фільтри, що будуються на реактивних елементах. Схеми цих фільтрів зображені на рис. 6.

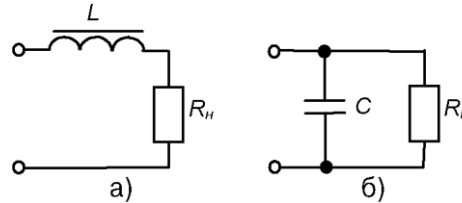


Рисунок 6 – Індуктивний (а) та ємнісний (б) фільтри L

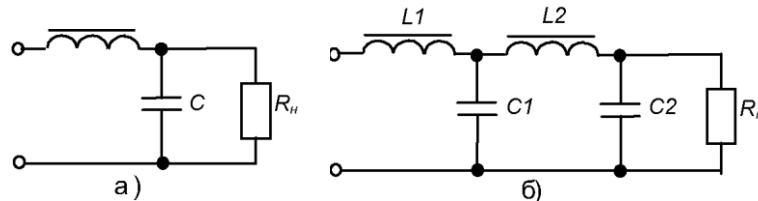


Рисунок 7 - Г-подібні LC-фільтри: одноланковий (а) і дволанковий (б)

Поряд із простими фільтрами використовуються складні, що являють собою сполучення певним чином увімкнених дроселів та конденсаторів.

Найширшого використання набули Г-подібні LC-фільтри (одноланкові або багатоланкові), зображені на рис. 7.

На рис. 8 зображена схема П-подібного LC-фільтра.

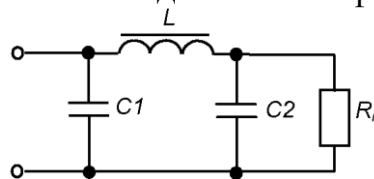


Рисунок 8 – П-подібний LC-фільтр

Ефективність роботи фільтра визначається коефіцієнтом згладжування:

$$K_{\text{зг}} = \frac{K_{\text{пвх}}}{K_{\text{пвих}}}$$

що показує, наскільки зменшується пульсація на виході фільтра $K_{\text{пвих}}$ відносно пульсації на його вході $K_{\text{пвх}}$.

Розглянемо роботу однофазних двопівперіодних випрямлячів на активно-ємнісному навантаженні. Випрямляч працює на протиелектрорушійну силу (проти-е.р.с.). Схема такого випрямляча зображена на рис. 9.

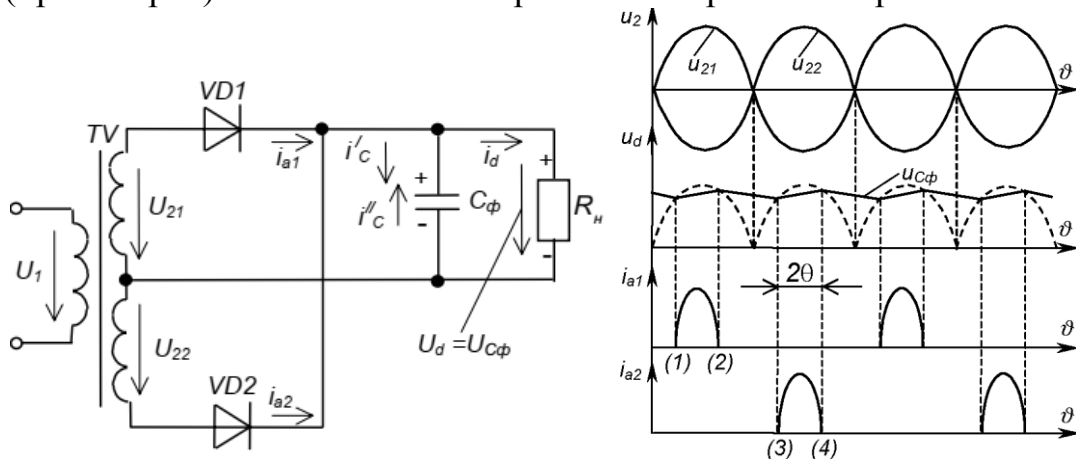


Рисунок 9 – Однофазний двопівперіодний випрямляч з активно-ємнісним навантаженням та часові діаграми роботи

Тут завдяки ємнісному фільтру напруга на навантаженні R_H має згладжений характер, а заряджений конденсатор C_ϕ виступає як джерело проти-е.р.с.

У результаті цього діоди VD1 або VD2 знаходяться у провідному стані лише тоді, коли $u > u_{C\phi}$.

7. Стабілізатори напруги

Для того, щоб забезпечити підтримання напруги на навантаженні на незмінному рівні при змінах напруги мережі або змінах опору навантаження у зазначених межах, а також при дії інших дестабілізуючих факторів, використовують спеціальні пристрої - стабілізатори напруги.

Стабілізатори безперервної дії поділяються на параметричні та компенсаційні.

Параметричні стабілізатори працюють за рахунок зміни власних параметрів електронних нелінійних приладів і можуть виконуватися на основі напівпровідникових приладів, вихідна напруга яких мало залежить від струму, що протікає через прилад, наприклад, на стабілітронах.

Схема найпростішого параметричного стабілізатора зображена на рис. 10.

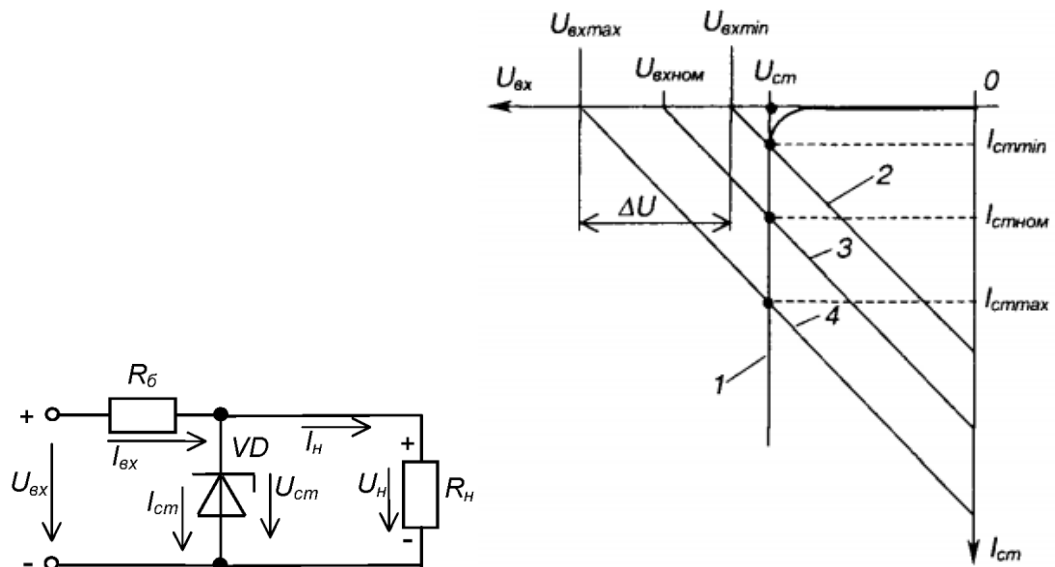


Рисунок 10 – Параметричний стабілізатор та навантажувальні характеристики (для $R_H \approx \infty$)

Стабілізатор також складається із баластного опору $R_б$, стабілітрона VD (найширшого використання набули кремнієві стабілітрони) та навантаження R_H .

Напруга стабілізації стабілітрона $U_{ст}$ вибирається рівною номінальній робочій напрузі навантаження U_H .

На рис. 10 наведено побудову навантажувальних характеристик стабілітрона. Тут прийнято такі позначення:

- 1 - ВАХ стабілітрона;
- 2 - лінія навантаження при $I_{ст \min}$;
- 3 - лінія навантаження при $I_{ст \text{ ном}}$;

4 - лінія навантаження при $I_{cm \max}$.

Із побудови витікає, що зміна входної напруги у межах від $U_{bx \min}$ до $U_{bx \max}$ не призводить до зміни напруги на навантаженні, що при цьому становить $U_H = U_{cm}$.

Як правило, задають

$$I_{cm \text{ном}} = \frac{I_{cm \max} - I_{cm \min}}{2}, \quad U_{cm} = \text{const}.$$

Вихідними даними для розрахунку елементів схеми є необхідне значення напруги на навантаженні U_H і максимальний струм навантаження $I_{H \max}$, а також допустимі відхилення напруги мережі живлення.

Необхідно визначити тип стабілітрона (за напругою стабілізації і допустимими струмами стабілізації) і значення та потужність баластного опору.

Зрозуміло, що $U_H = U_{cm}$.

Для забезпечення ефективної роботи стабілізатора бажано вибрати

$$U_{bx} = (2 \dots 3) U_{ct}.$$

Якщо опір навантаження має незмінне значення $R_H = \text{const}$, то розрахунок схеми зручно проводити аналітично за такими виразами:

$$\begin{aligned} U_{ex \max} &= R_{\delta} (I_H + I_{cm \max}) + U_{cm}; \\ U_{ex \min} &= R_{\delta} (I_H + I_{cm \min}) + U_{cm}; \\ \Delta U &= R_{\delta} (I_{cm \max} - I_{cm \min}); \\ R_{\delta} &= \frac{\Delta U}{I_{cm \max} - I_{cm \min}}. \end{aligned}$$

Для того щоб забезпечити працездатність пристрою при змінах опору навантаження від нескінченності (коли воно відімкнене) до мінімального значення $R_{H \min} = U_{cm} / I_{H \max}$, необхідно виконати умови:

$$\begin{aligned} I_{ex \max} &= \frac{U_{ex \max} - U_{cm}}{R_{\delta}} < I_{cm \max} \quad (\text{що відповідає } R_H = \infty); \\ I_{cm} &= I_{ex \min} - I_{H \max} > I_{cm \min} \quad (\text{що відповідає } R_H = R_{\min}); \\ I_{ex \min} &= \frac{U_{ex \min} - U_{cm}}{R_{\delta}} \geq I_{H \max} + I_{cm \min}. \end{aligned}$$

Значення напруги $U_{bx \max}$ визначається для найбільшого позитивного відхилення напруги мережі, а значення струму $I_{bx \min}$ - для найбільшого негативного.

Стабілітрон обирають за значеннями U_{ct} , $I_{ct \min}$ і $I_{ct \max}$.

Ефективність роботи стабілізатора визначається коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex \text{ном}}} : \frac{\Delta U_{вх}}{U_H}; \quad K_{cm} \leq 100,$$

де K_{ct} - відношення відносної зміни напруги на вході стабілізатора до відносної зміни напруги на його виході;

ΔU_{bx} - зміни напруги на вході стабілізатора;

ΔU_{eux} - зміни напруги на виході стабілізатора.

До переваг параметричних стабілізаторів належить їхня простота та

надійність у роботі.

Недоліки: відносно низький $K_{\text{ст}}$, неможливість регулювання напруги стабілізації, низький коефіцієнт корисної дії через втрати потужності в R_6 .

Компенсаційні стабілізатори - це замкнуті системи автоматичного регулювання із жорстким негативним зворотним зв'язком. Основним елементом стабілізатора є так званий регулюючий елемент, зміною опору якого досягають стабілізації напруги на навантаженні.

Регулюючий елемент може вмикатися як паралельно навантаженню (у стабілізаторах паралельного типу), так і послідовно з ним (у стабілізаторах послідовного типу). На рис. 11 наведені структурні схеми стабілізаторів обох типів.

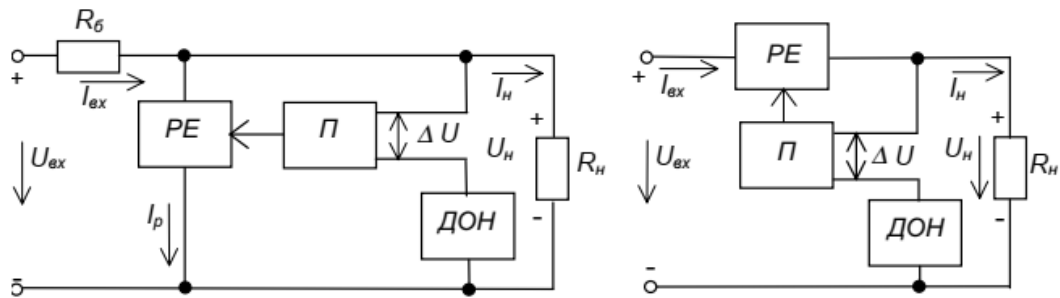


Рисунок 11 – Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів паралельного (а) та послідовного (б) типу

На схемах позначено: РЕ - регулюючий елемент; П - підсилювач постійного струму; ДОН - джерело опорної напруги $U_{\text{он}}$; R_6 - баластний опір; $R_н$ - навантаження.

Стабілізатори працюють таким чином.

На вхід підсилювача П подається напруга $\Delta U = U_н - U_{\text{он}}$ (напруга роззгодження), що після підсилення керує опором РЕ таким чином, щоб підтримувати напругу на виході стабілізатора незмінною.

Для стабілізатора паралельного типу маємо

$$U_н = U_{\text{вх}} - R_6(I_н + I_p) = \text{const.}$$

Надлишок напруги падає тут на R_6 .

Для стабілізатора послідовного типу -

$$U_н = U_{\text{вх}} - I_н R_{\text{РЕ}} = \text{const.}$$

Надлишок напруги в цій схемі падає на РЕ.

Споживана потужність стабілізатора паралельного типу:

$$P_1 = (U_{\text{вх}} - U_н)(I_p + I_н) + U_н I_p = I_p(U_{\text{вх}} - U_н) + U_{\text{вх}} I_p.$$

Для стабілізатора послідовного типу - $P_2 = (U_{\text{вх}} - U_н) I_н$.

Стабілізатор послідовного типу є більш економічним та ефективним і тому набув широкого використання.

Найпростіший компенсаційний стабілізатор послідовного типу можна побудувати на основі параметричного стабілізатора на стабілітроні та емітерного повторювача, як це показано на рис. 12. Тут емітерний повторювач забезпечує підсилення потужності (за рахунок підсилення струму) параметричного стабілізатора.

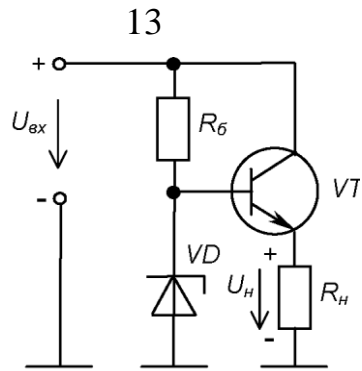


Рисунок 12 – Простий компенсаційний стабілізатор

Зараз широко використовують стабілізатори напруги компенсаційного типу у інтегральному виконанні.

8. Стабілізатори струму

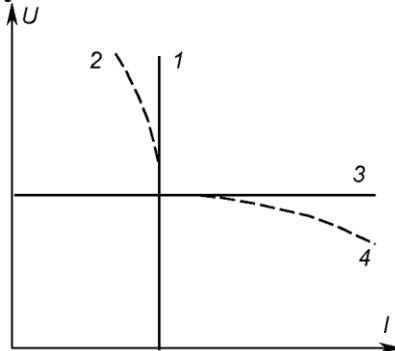


Рисунок 13 – ВАХ стабілізаторів струму (1,2) і напруги (3, 4)

На рис. 13 зображені ВАХ стабілізаторів (джерел) напруги та струму.

На рисунку позначено:

- 1 - ВАХ ідеального джерела струму;
- 2 - ВАХ реального джерела струму;
- 3 - ВАХ ідеального джерела напруги;
- 4 - ВАХ реального джерела напруги.

Прикладом малопотужного стабілізатора струму може служити схема, наведена на рис. 14.

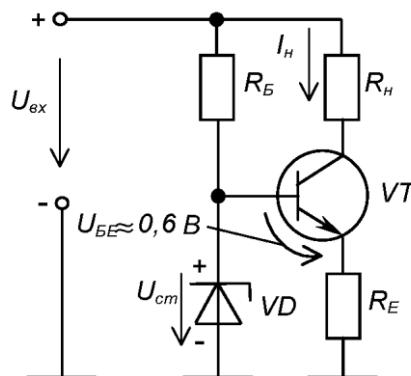


Рисунок 14 – Стабілізатор струму

Значення струму у навантаженні I тут визначається значеннями напруги стабілізації U_{cm} стабілітрона VD і опору резистора R_E . Вона становить:

$$I_n = \frac{U_{cm} - U_{BE}}{R_E}.$$

Це забезпечується тим, що, як відомо, струм колектора біполярного

транзистора визначається значеннями струму його бази і коефіцієнта підсилення за струмом, але не залежить від напруги у силовому колі - між колектором і емітером у наведеному прикладі, а отже, і від величини опору навантаження у колі колектора.

Особливою ефективністю при перетворенні джерела напруги у джерело струму із забезпеченням великої потужності відзначаються електромагнітні (індуктивно-ємнісні) перетворювачі - схеми Бушера. Регулювання в них відбувається на стороні змінного струму (виходячи із суті побудови перетворювача, що, звичайно, може бути використаний для живлення навантажень змінного струму).

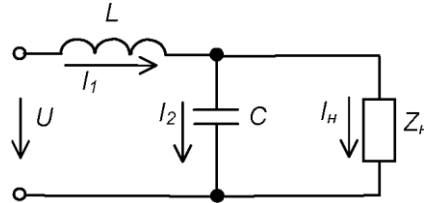


Рисунок 15 – Найпростіший індуктивно-ємнісний перетворювач

Найпростішим прикладом індуктивно-ємнісного перетворювача є послідовний LC-контур, схема якого зображена на рис. 15.

За певних умов ця схема є перетворювачем джерела напруги у джерело струму, коли струм навантаження I не залежить від опору навантаження Z' а зумовлюється лише значенням вхідної напруги $U_{\text{вх}}$.

Знайдемо ці умови:

$$\begin{aligned} Z_1 &= j\omega L; \quad Z_2 = -j\frac{1}{\omega C}; \\ I_1 &= \frac{U}{Z_0}; \\ Z_0 &= Z_1 + \frac{Z_n Z_2}{Z_n + Z_2} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_n (Z_1 + Z_2)}{Z_2 + Z_n}; \\ I_n &= \frac{I_1 Z_2}{Z_2 + Z_n} = \frac{U Z_2}{Z_0 (Z_2 + Z_n)} = \frac{U}{Z_1 + \frac{Z_n}{Z_2} (Z_1 + Z_2)}. \end{aligned}$$

Умова перетворення у джерело струму $Z_1 + Z_2 = 0$ або $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

Тоді
$$I_n = \frac{U}{Z_1}.$$

Ця схема - ідеальний перетворювач за умови відсутності активних втрат у LC-контурі.