

Лекція 4. СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ І СТРУМУ

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.

4.1. Параметричні стабілізатори

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.

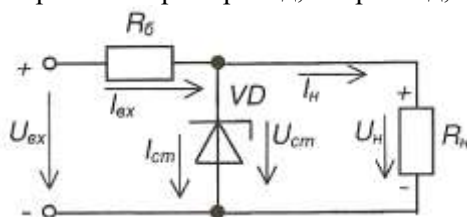


Рис. 4.1 - Параметричний стабілізатор

Схема найпростішого параметричного стабілізатора зображена на рис. 4.1. Стабілізатор складається із баластного опору R_b , 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. 4.2 наведено побудову навантажувальних характеристик стабілітрона. Тут прийнято такі позначення:

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

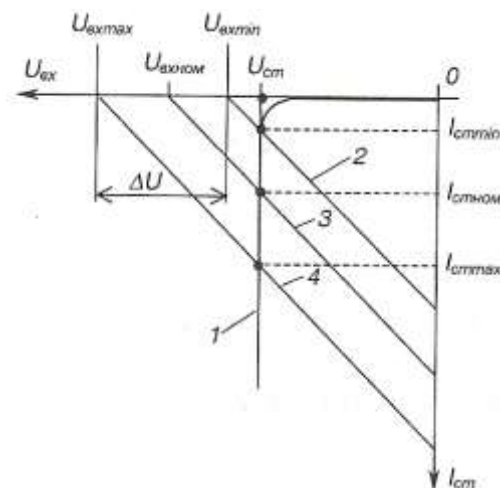


Рис. 4.2 - Побудову навантажувальних характеристик стабілітрона (для $U_H = \infty$)

Із побудови випливає, що зміна вхідної напруги у межах від $U_{вх\ min}$ до $U_{вх\ max}$ не призводить до зміни напруги на навантаженні, що при цьому становить $U_H = U_{ст}$ (якщо не враховувати динамічного опору стабілітрона).

Як правило задають:

$$I_{ст\ ном} = \frac{I_{ст\ max} - I_{ст\ min}}{2}, U_{ст} = const. \quad (4.1)$$

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 вибирати

$$U_{ex} = (2 \dots 3) U_{cm}. \quad (4.2)$$

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

$$U_{ex \max} = R_o (I_H + I_{cm \max}) + U_{cm}; \quad (4.3)$$

$$U_{ex \min} = R_o (I_H + I_{cm \min}) + U_{cm}; \quad (4.4)$$

$$\Delta U = R_o (I_{cm \max} - I_{cm \min}); \quad (4.5)$$

$$R_o = \frac{\Delta U}{I_{cm \max} - I_{cm \min}}; \quad (4.6)$$

Для того, щоб забезпечити працездатність пристрою при змінах опору навантаження від нескінченності (коли воно відімкнене) до мінімального значення

$$R_{H \min} = U_{cm} / I_{H \max}, \quad (4.7)$$

необхідно виконати умови:

$$I_{ex \max} = \frac{U_{ex \max} - U_{cm}}{R_o} < I_{cm \max} \quad (\text{що відповідає } R_H = \infty); \quad (4.8)$$

$$I_{cm} = I_{ex \min} - I_{H \max} > I_{cm \min} \quad (\text{що відповідає } R_H = R_{\min}); \quad (4.9)$$

$$I_{ex \min} = \frac{U_{ex \min} - U_{cm}}{R_o} \geq I_{H \max} + I_{cm \min}. \quad (4.10)$$

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

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

Потужність баластного резистора:

$$P_{Ro} \geq R_o I_{ex \max}^2. \quad (4.11)$$

Ефективність роботи стабілізатора визначається коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta U_{ex \text{ ном}}} / \frac{\Delta U_{вих}}{U_H}; \quad K_{cm} \leq 100, \quad (4.12)$$

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

ΔU_{ex} - зміни напруги на вході стабілізатора;

$\Delta U_{вих}$ - зміни напруги на виході стабілізатора.

До переваг параметричних стабілізаторів належить їх простота та надійність у роботі.

Недоліки: відносно низький K_{cm} , неможливість регулювання напруги стабілізації, низький коефіцієнт корисної дії через втрати потужності в R_o .

4.2. Компенсаційні стабілізатори

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. 4.3 наведені структурні схеми стабілізаторів обох типів.

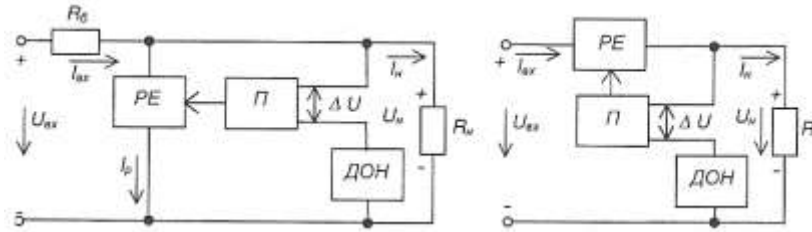


Рис. 4.3 - Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів паралельного (а) та послідовного (б) типу

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

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

Для стабілізатора паралельного типу маємо

$$U_H = U_{вх} - R_б(I_H + I_P) = const. \quad (4.13)$$

Надлишок напруги спадає тут на $R_б$.

Для стабілізатора послідовного типу:

$$U_H = U_{вх} - I_H R_{PE} = const. \quad (4.15)$$

Надлишок напруги в цій схемі спадає на РЕ.

Споживана потужність стабілізатора паралельного типу:

$$P_1 = (U_{вх} - U_H)(I_P + I_H) + U_H I_P = I_H(U_{вх} - U_H) + U_{вх} I_P. \quad (4.16)$$

Для стабілізатора послідовного типу:

$$P_2 = I_H(U_{вх} - U_H) \quad (14.17)$$

Стабілізатор послідовного типу є більш економічним 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. 4.4. Тут емітерний повторювач забезпечує підсилення потужності (за рахунок підсилення струму) параметричного стабілізатора.

Якщо замість стабілітрона до схеми ввести конденсатор, отримаємо активний ємнісний фільтр, ефективна ємність якого перевищує встановлену у β разів (β - коефіцієнт підсилення транзистора за струмом у схемі з СЕ).

Схема складнішого і потужнішого компенсаційного стабілізатора послідовного типу, що забезпечує можливість регулювання вихідної напруги (напруги на навантаженні), наведена на рис. 4.5. Тут регулюючим елементом є транзистор VT1, а підсилювач сигналу зворотного зв'язку - VT2. За джерело опорної напруги править параметричний стабілізатор, виконаний на стабілітроні VD1 та резисторі R_2 . Дільник напруги на резисторах $R_3 - R_5$ з коефіцієнтом ділення k є давачем сигналу зворотного зв'язку.

Підсилювач сигналу розузгодження VT2 під дією напруги $\Delta U = kU_H - U_{cm}$ змінює опір VT1 таким чином, щоб підтримувати напругу на навантаженні незмінною:

$$U_H = U_{вх} - \Delta U_{PE} = const. \quad (4.18)$$

Нехай $U_{вх}$ зростає і це повинно призвести до зростання U_H . Тоді також зростає $\Delta U = kU_H - U_{cm}$, що викликає зростання колекторного струму VT2 I_{K2} та зменшення базового струму VT1, оскільки $I_{B1} = (I_1 - I_{K2})$. Опір VT1 зростає, а значить зростає і падіння напруги на ньому ΔU_{PE} , а $U_H = U_{вх} - \Delta U_{PE} = const$ - залишається незмінним.

Таким чином, стабільність вихідної напруги підтримується завдяки негативному зворотному зв'язку.

Змінюючи положення регулятора резистора R_4 , можна змінювати вихідну напругу U_H .

При
$$\Delta U \rightarrow \infty; kU_H = U_{cm}; U_H = \frac{U_{cm}}{k}. \quad (4.19)$$

Коефіцієнт стабілізації такого стабілізатора може сягати $K_{cm} > 1000$.

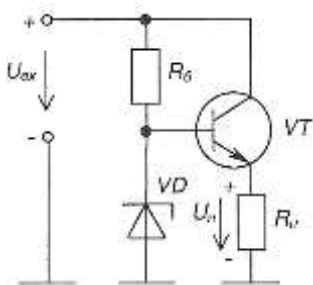


Рис. 4.4 - Простий компенсацийний стабілізатор

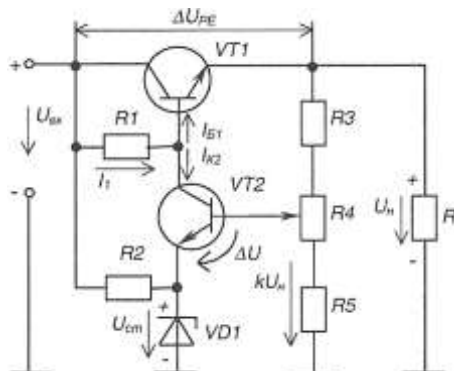


Рис. 4.5 - Компенсацийний стабілізатор послідовного типу з регульованою вихідною напругою

Зараз широко використовують стабілізатори напруги компенсацийного типу у інтегральному виконанні з потужністю до 100Вт. Окрім надзвичайно якісного виконання основної функції (стабілізації напруги), вони, за рахунок введення до складу мікросхеми додаткових вузлів, забезпечують також захист від короткого замикання у навантаженні та від перевантаження (від перевищення температури корпусу). Маючи у своєму складі кілька десятків елементів, такі стабілізатори розміщуються у корпусі звичайного потужного транзистора. Випускаються ІМС стабілізаторів як з фіксованими значеннями вихідної напруги, так і з можливістю її регулювання за допомогою зовнішнього резисторного дільника.

4.3. Стабілізатори струму

Часто виникає необхідність стабілізації значення не напруги на навантаженні, а його струму (наприклад, при заряді акумуляторних батарей, в електрохімічних реакторах і т.п.).

Оскільки реально ми маємо справу з джерелами напруги, постає проблема перетворення джерела напруги у джерело струму.

Прикладом малопотужного стабілізатора струму може служити схема, наведена на рис. 4.6.

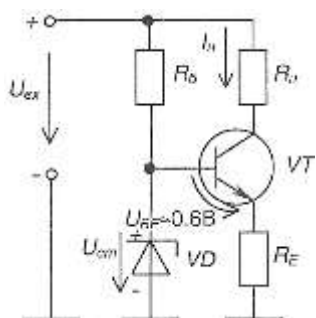


Рис. 4.6 Стабілізатор струму

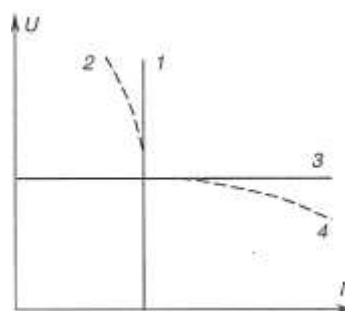


Рис. 4.7 – ВАХ стабілізаторів струму (1,2) і напруги (3,4)

На рис. 4.7 зображені вольт-амперні характеристики (ВАХ) стабілізаторів (джерел) напруги та струму, де позначено:

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

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

$$I_H = \frac{U_{cm} - U_{BE}}{R_E}. \quad (4.20)$$

Умова (4.8) забезпечується тим, що, як відомо, струм колектора біполярного транзистора визначається значеннями струму його бази і коефіцієнта підсилення за струмом, але не залежить від напруги в силовому колі між колектором і емітером у наведеному прикладі, а отже, і від величини опору навантаження у колі.

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). Найпростішим прикладом індуктивно-ємнісного перетворювача є послідовний LC-контур, схема якого зображена на рис. 4.8.

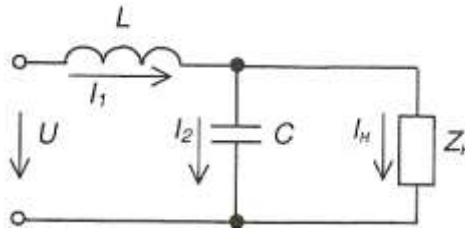


Рис. 4.8 – Найпростіший індуктивно-ємнісний перетворювач

За певних умов ця схема є перетворювачем джерела напруги у джерело струму, коли струм навантаження I_H не залежить від опору навантаження Z_H , а обумовлюється лише значенням вхідної напруги $U_{вх}$.

Знайдемо ці умови:

$$\dot{Z}_1 = j\omega L; \quad \dot{Z}_2 = -j\frac{1}{\omega C}; \quad (4.21)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_0}; \quad (4.22)$$

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_H \dot{Z}_2}{\dot{Z}_H + \dot{Z}_2} = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_H (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_H}; \quad (4.23)$$

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{I}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_H} = \frac{\dot{U} \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_H)} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_H}{\dot{Z}_2} (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)}. \quad (4.24)$$

Умова перетворення у джерело струму $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 = 0$, або $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

Тоді:
$$I_H = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1}.$$

Ця схема - ідеальний перетворювач за умови відсутності активних втрат у LC-контурі. Оскільки насправді активні втрати досить суттєві, використовують більш складні схеми індуктивно-ємнісних перетворювачів. Одна з промислових схем зображена на рис. 4.9. Вона складається із стабілізатора змінної напруги, двох магнітозв'язаних дроселів L_1 та L_2 (котушки цих дроселів розміщені на одному магнітопроводі і мають однакову кількість витків), конденсатора C та трансформатора TV.

Умова, за якої схема перетворює джерело напруги у джерело струму:

$$\omega L_1 = \frac{1}{\omega C_1}, \quad \text{коли } I = \frac{U}{Z_{onm}}, \quad Z_{onm} = \omega L_1 (1 + K_{зв}). \quad (4.25)$$

Коефіцієнт зв'язку $K_{зв} = 0,8 \div 0,9$ відображає ступінь електромагнітного зв'язку дроселів L_1 і L_2 .

Ця схема є джерелом струму, якщо

$$Z'_H \leq Z_{om}, \quad (4.26)$$

де $Z'_H = n^2 Z_n$ зведений до первинного кола трансформатора опір навантаження;
 $n = w_1 / w_2$ - коефіцієнт трансформації трансформатора.

Підбираючи n , можна досягти виконання умови –

$$n^2 Z_n \leq \omega L_1 (1 + K_{36}). \quad (4.27)$$

Звідси отримуємо:

$$n = \sqrt{\frac{\omega L_1 (1 + K_{36})}{Z_n}}. \quad (4.28)$$

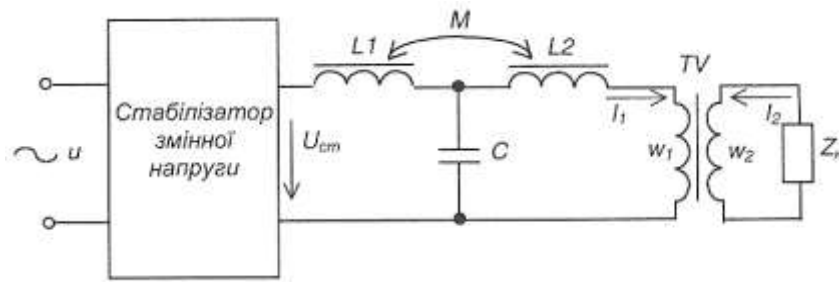


Рис. 4.9 - Промислова схема індуктивно-ємнісного перетворювача