

ЄМНІСНИЙ СТАБІЛІЗАТОР ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

к.т.н. А.М. Панченко, А.Б. Кульчицький, А.С. Рогозін
(подав д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

В статті запропоновано ємнісний стабілізатор постійної напруги, приведена його схема та диференційні рівняння, які описують процеси перетворення та стабілізації енергії. Викладені результати розрахунку його основних характеристик.

Стабілізатори постійної напруги є важливим елементом в системі електропостачання космічних об'єктів. Особливістю ємнісного стабілізатора постійної напруги (ЄСПН) є те, що перетворення напруги здійснюється без використання індуктивностей як силових перетворюючих елементів. Індуктивності використовуються лише для обмеження кидка струму на ємності у початковий момент. Принципова схема такого стабілізатора показана на рис. 1.

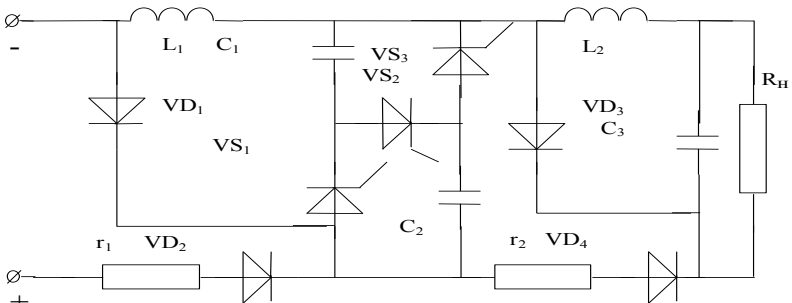


Рис. 1. Ємнісний стабілізатор постійної напруги
Рис.1. Ємнісний стабілізатор постійної напруги

При відкритті тиристорів VS_1 , VS_3 відбувається заряд ємностей C_1 і C_2 у паралельному режимі від джерела постійної напруги. По завершенню заряду ємностей вказані тиристори закриваються і відкривається тиристор VS_2 , ємності C_1 і C_2 розряджаються на навантаження R і фільтруючий конденсатор C_3 . Таким чином, вихідна напруга може бути більше вхідної. Індуктивності L_1 , L_2 відповідають індуктивним складовим зарядного і розрядного кіл. Опори r_1 , r_2 будемо вважати сумарним опором ключових елементів. Зворотні діоди VD_1 , VD_3 вмикаються, якщо в момент комутації ще залишилася енергія, накопичена в індуктивностях. Діоди VD_2 і VD_4 працюють в ключовому режимі сумісно з відповідними

тиристорами, що забезпечує надійне їх закриття. Рівень вихідної напруги контролюється схемою управління і при її зменшенні частота управляючих сигналів збільшується або навпаки, що забезпечує стабілізацію вихідної напруги.

Для математичного опису розглянутого перетворювача скористаємося схемою, представленою на рис. 2. Призначення елементів на рис. 2

відповідає рис. 1 за винятком того, що на рис. 2 не показані зворотні діоди. Ємність в пунктирному квадраті означає, що використовується вузол, розглянутий в попередній схемі, та забезпечує

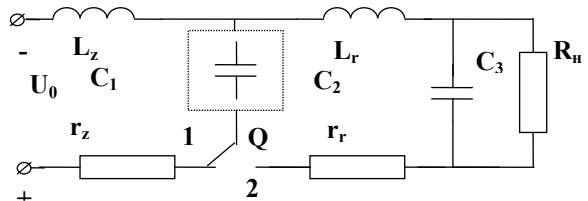


Рис. 2. Спрощена схема ЄСПН

й зміну ємності таким чином, що при заряді ключа Q знаходиться у положенні 1, а ємність $C_1 = nC$, де n – кількість конденсаторів C , з'єднаних паралельно, а ємність $C_2 = C/n$ – це ємність розрядного кола. Слід вказати, що є можливість одночасно виконувати як стабілізацію, так і перетворення в певних межах вихідної напруги. У подальшому будемо виходити із припущення, що перемикання ключа відбувається миттєво.

Математичне обґрунтування роботи ЄСПН знайдемо, скориставшись розглядом фізичних процесів, які мають місце при зміні стану ключа Q . Перший цикл роботи перетворювача полягає у заряді ємності C_1 від джерела постійної напруги U_0 по колу, що складається з активного опору ключа, індуктивності L_1 і ємності C_1 . Цей цикл описується диференціальним рівнянням другого порядку при нульових початкових умовах. Другий цикл роботи перетворювача полягає у розряді ємностей C_2 на індуктивність L_2 , опір ключа r_2 та фільтруючу ємність C_3 через навантаження R . Цей цикл описується диференціальним рівнянням другого порядку зі змінними коефіцієнтами. Оскільки режим вибирається таким чином, що ємності не встигають повністю розрядитись, то при повторному включенні ключа Q в положення 1, ємність C_3 продовжує розряджатися на навантаження, а ємність C_1 починає заряджатися при ненульових початкових умовах. У подальшому, у кожному наступному рівнянні початковими умовами є кінцеві умови попереднього рівняння. На ємностях у кожному такті буде збільшуватися значення залишкового заряду доки не настане рівновага.

Із рівнянь зміни заряду відносно часу можна знайти такі характеристики ЄСПН, як ККД, коефіцієнт пульсацій, відхилення напруги при навантаженні та дослідити різноманітні режими його роботи.

Диференціальне рівняння першого такту процесу заряду ємності C_1

запишемо у вигляді

$$U_0 - q(t)/C_1 - L_1 q'(t) - r q(t)' = 0, \quad q(t=0) = 0; \quad q'(t=0) = 0,$$

де $q(t)$ - заряд на обкладинці конденсатора C_1 .

Слід зауважити, що при отриманні закону зміни заряду $q(t)$ стане можливим знайти кількість кулонів в кінці заряду на ємності C_1 , а оскільки ємності переходять з паралельного вмикання (C_1) у послідовне (C_2), та відповідно відбувається кратне зменшення кількості зарядів $q_0 = q(t = 0.0005)/n$ то можливо знайти початкові умови для наступного циклу роботи. У подальшому будемо розглядати ЄСПН, який здатний підвищувати напругу, і у якого, при заряді ємності C з'єднані паралельно $C_1 = 2C$, а при розряді послідовно $C_2 = C/n$. Термін часу заряду і розряду становить 0.5мс, загальна частота комутації ключа Q дорівнює 1кГц. Слід зауважити, що у випадку підвищуючого ЄСПН доцільно використовувати коливальний заряд ємності, але це потребує збільшення значення індуктивності L . Після заряду ємності C_1 ЄСПН переходить у послідовне вмикання конденсаторів. У мить комутації передачі енергії не відбувається, а має місце зміна схеми вмикання. Енергія, що на цю мить знаходилась в індуктивності L_z , передається на ємність C_2 через зворотний діод VD_1 . Виходячи із умови балансу енергії, маємо

$$W(t = 0,0005) = \frac{1}{2Li^2} (t = 0,0005) = L \frac{q_L^2 \times t^2}{2}, \quad (1)$$

звідки $q_L = i \times 0,0005$.

Розряд ємності C_2 на ємність C_3 (рис.2) і навантаження R описується диференційним рівнянням

$$\frac{q_2(t)}{C_2} - \frac{q_3(t)}{C_3} = L(q_{02} - q_2(t))'' + r(q_{02} - q_2(t))', \quad (2)$$

де $q_{02} = q_0 + q_z$ початковий заряд на C_2 , отриманий в процесі попереднього заряду; $q_2(t)$ - заряд на C_2 на час t ; $q_3(t)$ - заряд, що знаходиться на C_3 . Згідно із законом збереження зарядів можна записати

$$q_{02} = q_2(t) + q_3(t) + i_r(t)r_0. \quad (3)$$

Виходячи з того, що $i_R(t)t$ - заряд, що перемістився через навантаження R , а ємність C_3 ввімкнута паралельно по відношенню до навантаження R (рис. 2), справедлива наступна залежність $\frac{q_3(t)}{C_3} = i_R(t)R$, тому

$$i_R(t) = \frac{q_3(t)}{C_3 R}. \quad (4)$$

Підставивши співвідношення (4) у формулу (3), отримаємо

$$q_{02} = q_2(t) + q_3(t) + \frac{q_3(t)t}{RC_3}; \quad q_3(t) = \frac{q_{02} - q_2(t)}{RC_3 + t} RC_3. \quad (5)$$

Виконуючи перетворення згідно з рівнянням (2), отримаємо

$$\frac{q_2(t)}{C_2} - \frac{q_{02} - q_2(t)}{RC_3 + t} R = -Lq_2(t)'' - rq_2(t) \quad (6)$$

Врешті решт із рівняння (6) одержимо

$$q_2''(t) = -\frac{1}{L} \left[rq_2(t)' + \frac{q_2(t)}{C_2} - \frac{q_{02} - q_2(t)}{RC_3 + t} \times R \right], \quad (7)$$

початкові умови $q(t=0) = q_{02}$; $q'(t=0)' = 0$.

Кінцеве значення заряду $q(t=0.0005)$ на ємності C_2 помножене на n (перехід з послідовного вмикання ємностей C_2 на паралельне вмикання C_1), є початковою умовою для наступного такту заряду ($q_{20} = q(t=0.0005) \cdot n$). Під тактами роботи ЄСПН розуміємо послідовність таких процесів: заряд ємностей C_1 від мережі, розряд ємностей C_2 на C_3 і розряд ємності C_3 на навантаження R . Після наступного перемикавання ключа Q у положення 1 має місце два паралельних процеси: одночасно відбувається заряд ємностей C_1 у паралельному вмиканні від джерела живлення та продовжується розряд ємності C_3 на навантаження R . Розряд ємності C_3 на навантаження R , описується рівнянням

$$U_{C_3} = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC_3}} \right) = \frac{q_{03}}{C_3} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC_3}} \right), \quad (8)$$

де q_{03} - заряд, що залишився на ємності C_3 у мить закінчення розряду на неї ємності C_2 (знаходиться завдяки рішенню рівняння(7)).

Початковими умовами для наступного такту роботи ЄСПН (заряд ємності C_1) є значення заряду на ємності C_1 ($q_{20} = q(t=0,0005)n$). Рівняння для цього процесу з врахуванням початкових умов має вигляд

$$U_0 - (q(t) + q_{20})/C_1 - L_1 q(t)'' - rq(t)' = 0, q(t=0) = q_{20}; \quad (9)$$

q_{20} - заряд, що залишився на ємності C_1 .

Зрозуміло, що заряд відбувається при наявності напруги на C_1 , що у свою чергу зменшує початковий кидок струму, а отже і втрати на активному опорі.

Через те, що ємність C_2 буде розражатися на ємність C_3 , на якій існує заряд $q(t = t_{\text{кінцеве}}) = q_{03}$, рівняння процесу розряду буде мати вигляд

$$q(t)'' = -\frac{1}{L} \left[rq(t)' + \frac{1}{C_2} q(t) - \frac{q_{202} + q_{03} - q(t)}{RC_3 + t} \times R \right]. \quad (10)$$

Початкові умови рівняння (10) є $q(t=0) = q_{202}$, $q'(t=0) = 0$, отримані внаслідок рішення рівняння (9). В (10) прийнято, що q_{202} - заряд на C_2 другого такту; q_{03} - залишковий заряд на C_3 . У другому такті напруга на

C_2, C_3 зростає порівняно з першим тактом внаслідок того, що ємності не встигають розрядитися.

Починаючи з другого такту, диференційні рівняння (8),(9),(10) не змінюються, їх початкові умови знаходяться як результат вирішення попередніх рівнянь. Блочна схема зв'язку рівнянь показана на рис. 3, де кожному блоку відповідає номер рівняння.

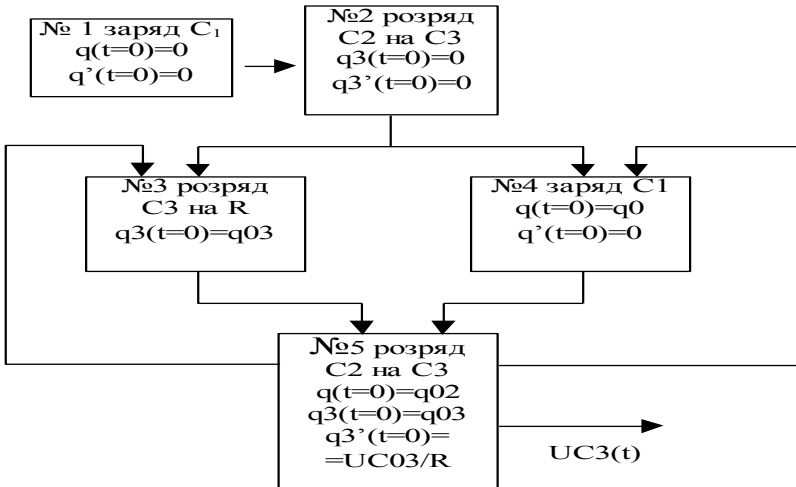


Рис. 3. Схема зв'язку рівнянь

Для визначення кількості тактів, необхідних для того, щоб режим вважати сталим, достатньо взяти різницю, наприклад, максимальних напруг на C_3 , між наступним тактом і попереднім, у випадку коли ця різниця не перевищує наперед задане число ϵ (залежно від потрібної точності), то це й буде сталий режим. Послідовне збільшення напруг на ємностях C_2, C_3 , зміни миттєвих потужностей у першому і другому тактах роботи перетворювача, а також у сталому режимі, свідчить про те, що ЄСПН входить у стан, при якому існує рівновага між енергією, що поступає від джерела, і спожитою навантаженням. ККД визначається в кожному такті як відношення енергій, що виділилися на навантаженні R , до енергії, що надходить від джерела живлення з постійною напругою 50В

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\int_0^{0,0005} N_R(t) dt}{\int_0^{0,0005} N_{C_1}(t) dt}, \quad (11)$$

де W_2 - енергія, що виділилась на навантаженні R ; W_1 - енергія, що постуила з мережі.

Коефіцієнт пульсацій визначався за формулою

$$k = \frac{U_{\max c_3} - U_{\min c_3}}{U_{cp}}; U_{cp} = \frac{1}{0.001} \left(\int_0^{0.0005} U_{c_2 c_3}(t) dt + \int_0^{0.0005} U_{c_3}(t) dt \right),$$

де $U_{C_2 C_3}$ - напруга на R при розряді C_2 на C_3 ; U_{C_3} - напруга на R при розряді C_3 .

Значення ККД, коефіцієнта пульсації, середньої напруги наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення ККД, коефіцієнта пульсації, середньої напруги

№ такту	ККД (%)	Середня напруга на навантаженні R (В)	Коефіцієнт пульсації (%)
1	<1%		
2	<1%		
40	80.37	82.0998	0.83
80	92.06	83.6168	0.83
100	94.01	83.8419	0.83
120	94.34	83.870	0.83

Оскільки значення коефіцієнта пульсації є досить мале, можна не враховувати енергію, яка може поступати в навантаження R за рахунок зворотного діода VD_3 та індуктивності L_2 .

Таким чином, одержані рівняння дозволяють отримати практично всі аналітичні характеристики перетворювача, знати такі показники як ККД, коефіцієнт пульсації, середню напругу та інші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. Россия. N2040844. Бестрансформаторное устройство форсированного заряда аккумуляторных батарей асимметричным током / Панченко А., Гордиенко В. // Б.И.1995. N21.
2. Ахизер А.И. Электрические и магнитные явления. – К.: Наук. думка, 1981. – 228 с.
3. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 480 с.

Поступила 24.04.2002

ПАНЧЕНКО *Анатолій Миколайович*, канд. техн. наук, нач. кафедри ХВУ. У 1978 році закінчив ХВВКІУ. Область наукових інтересів – енергетика.

КУЛЬЧИЦЬКИЙ *Андрій Борисович*. У 1974 закінчив КПВВКІУ. Область наукових інтересів – енергетика.

РОГОЗІН *Анатолій Сергійович*, ад'юнкт ХВУ. У 1995 році закінчив Харківський військовий університет. Область наукових інтересів – енергетика.