

## ПРО ГРАНИЧНІ РІШЕННЯ РІВНЯНЬ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*В статті досліджене питання розрахунку режимів напруги високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням за допомогою аналітичного методу при різних умовах вибору значень його складових елементів. Особливість методу дослідження полягає в тому, що при проведенні багатоваріантних розрахунків залишаються незмінними вихідні параметри навантаження генератора. Для каскадного високовольтного джерела постійного струму знайдені умови, при яких можуть бути суттєво зменшені ємності високовольтних конденсаторів каскадного генератора.* Бібл. 8, табл. 2, рис. 5.

**Ключові слова:** каскадне джерело високої напруги, аналітичний метод, амплітуда пульсацій напруги, нелінійне навантаження, граничні значення ємностей.

*В статье исследован вопрос расчета режимов напряжения высоковольтного каскадного генератора с нелинейной нагрузкой с помощью аналитического метода при различных условиях выбора значений его составляющих элементов. Особенность метода исследования заключается в том, что при проведении многовариантных расчетов остаются неизменными выходные параметры нагрузки генератора. Для каскадного высоковольтного источника постоянного тока найдены условия, при которых могут быть существенно уменьшены емкости высоковольтных конденсаторов каскадного генератора.* Библ. 8, табл. 2, рис. 5.

**Ключевые слова:** каскадный источник высокого напряжения, аналитический метод, амплитуда пульсацій напряжения, нелинейная нагрузка, предельные значения емкостей.

**Вступ.** Каскадний генератор постійного струму – одне з найбільш поширених джерел високої і надвисокої постійної напруги. Традиційна область використання каскадних генераторів – це живлення різної електрофізичної апаратури, зокрема, високовольтних прискорювачів різних типів. Вони успішно використовуються також для живлення електротехнічних пристроїв і для випробувань високовольтної апаратури, що працює на постійній напрузі.

Залежно від типу зв'язку між каскадами і способу живлення каскадів випрямлячів від джерела живлення розрізняють каскадні генератори з ємнісним або індуктивним зв'язком з послідовним живленням каскадів.

В даний час найбільш детально вивчені каскадні генератори з ємнісним зв'язком між каскадами і послідовним живленням від джерела. Генератори, зібрані за такою схемою, зазвичай прийнято називати генераторами Кокрофта-Уолтона [1].

Також постійну високу напругу одержують за допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, основними елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік та струмообмежувальні резистори [2].

Характерною ознакою каскадних генераторів є наявність пульсацій напруги на виході установки. В ряді публікацій відзначають суттєвий вплив пульсацій напруги в таких генераторах [3, 4], але кінцевого рішення, за допомогою якого можна було б точно визначити значення амплітуди та форми пульсацій не було знайдено.

Дослідження режимів високовольтних каскадних установок постійного струму звичайно виконуються наближеними методами [2, 4] у допущенні незмінності їх параметрів у часі (лінійне наближення). Проте останнім часом у схемах таких установок використовують і нелінійні елементи, наприклад стабілітрони [5].

Запропоновані адекватні математичні моделі [6] для розрахунку подібного типу установок, зазвичай,

не враховують нелінійність параметрів їх складових елементів.

Разом з «класичними» схемами каскадних генераторів високої напруги [7] в останній час знайшли застосування каскадні генератори узагальненого типу [5], в яких традиційне каскадне помноження напруги доповнюється фільтром пульсацій та пристроєм їх нелінійного подавлення.

Теорія такого каскадного генератора високої напруги подана у нашій попередній публікації [8], суть якої коротко розглянемо нижче.

Функціональна схема електроживлення установки подвоєння високої напруги постійного струму у загальному випадку представлена на рис. 1. З виходу високовольтного підвищувального трансформатора ТР напруга  $u_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$  через розділовий конденсатор  $C_1$  поступає на вхід каскаду подвоєння напруги  $VD_1$ ;  $VD_2$ ;  $C_2$ , і далі через фільтр  $R_\phi$ ;  $C_3$  – на ланку стабілітронів  $ST_1 \dots ST_n$  з вихідним резистором  $r$ , паралельно якій включений омичний подільник напруги, навантаження якого можна замінити омичним опором  $R_{ПН}$ . Уведення стабілітронів в схему установки (рис. 1) пояснюється необхідністю зменшення пульсацій та, з другого боку, підвищення точності вимірювань високої напруги. Додатково до схеми установки [5] у схему на рис. 1 введені навантаження  $R_2$ ,  $R_3$ .

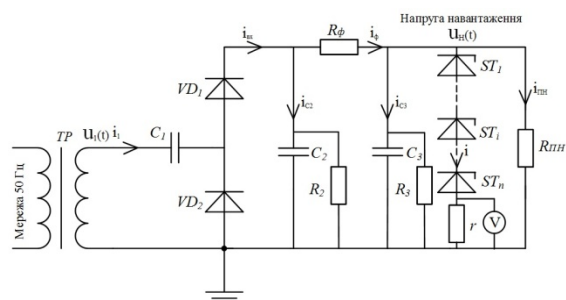


Рис. 1. Функціональна схема живлення установки високої напруги постійного струму

Вольт-амперна характеристика (як приклад, стабілітрона Д818Д) наведена на рис. 2. Її лінеаризований вираз запишемо в виді  $u_{st}(i) = u_0 + r_{\partial} \cdot (i - I_0)$ , де  $r_{\partial}$  – диференціальний опір стабілітрона.

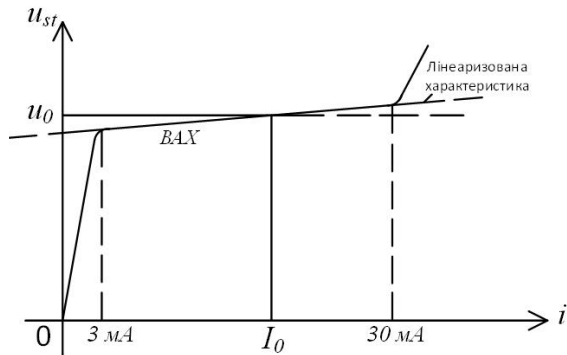


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д

Тоді для напруги навантаження (рис. 1) можна записати:  $u_{н} = (U_0 + I_0 r) + (i - I_0)(R_{\partial} + r)$ , де  $U_0$  – еквівалентна робоча напруга та  $R_{\partial}$  – еквівалентний диференціальний опір ланки стабілітронів.

Виділяючи в  $u_{н}(t)$  пульсацію напруги  $\Delta u(t) = u_{н}(t) - U_0 - I_0 r$  та проводячи перетворення, у [8] вперше одержана система рівнянь, яка описує процес в схемі каскадного генератора узагальненого типу.

У проміжку часу  $0 \leq t \leq T$ , де  $T$  – період напруги  $T=2\pi/\omega$ , в момент часу  $t_1$  розпочинається зарядження (підзарядження) конденсатора  $C_2$ , яке закінчується в момент часу  $t_2$ , ( $t_2 > t_1$ ) після чого в схемі рис. 1 відбувається перерозподіл напруги на протязі часу  $T-\Delta t_1$ , де  $\Delta t = t_1 - t_2$ .

Система рівнянь, яка описує усталений періодичний процес в схемі рис. 1 має вид [8]:

$$t_1 = \frac{\arcsin\left(\frac{1}{U_m} \cdot X_1 - 1\right)}{\omega}, \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} X_1 = & I_0 \cdot R_{\phi} + (U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_3} + \frac{R_{\phi}}{R_{ПН}}\right) + \\ & + (\Delta U_{усталене} + A_3 \cdot \sin \psi + A_4 + A_5) \times \\ & \times \left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{ПН}} + \frac{R_{\phi}}{R_3} + \frac{R_{\phi}}{R_{\partial} + r}\right) + \\ & + C_3 \cdot R_{\phi} \cdot (\omega \cdot A_3 \cdot \cos \psi + p_3 \cdot A_4 + p_4 \cdot A_5); \\ t_2 = & \frac{\arccos\left(\frac{X_2}{U_m \cdot \omega}\right)}{\omega}, \quad (2) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} X_2 = & C_3 \cdot R_{\phi} \cdot \left[-\omega^2 \cdot A_3 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t + \psi) + \right. \\ & \left. + p_3^2 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4^2 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t}\right] + \\ & + \left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{ПН}} + \frac{R_{\phi}}{R_3} + \frac{R_{\phi}}{R_{\partial} + r}\right) \times \\ & \times \left[\omega \cdot A_3 \cdot \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t}\right]; \end{aligned}$$

$\Delta u_{усталене} =$

$$\begin{aligned} & (U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_{\phi}}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_{\phi}}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \right. \\ & \left. - \frac{1}{R_2} + \frac{R_{\phi}}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_{\phi}}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}}\right] + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_2}\right) \\ & + \frac{1}{R_{\partial} + r} \cdot \left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_2}\right). \quad (3) \end{aligned}$$

При цьому в період зарядження  $t_1 \leq t \leq t_2$   $\Delta u(t)$  має вигляд

$$\begin{aligned} \Delta u_3(t) = & A_3 \cdot \sin(\omega(t - t_1) + \psi) + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + \\ & + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta u_{усталене}, \quad (4) \end{aligned}$$

а в період перерозподілу напруги при  $t \geq t_2$

$$\Delta u_{ПН}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} + \Delta u_{усталене}, \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{C_1 \cdot \omega \cdot U_m}{R_{\phi} \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[b_1^2 \cdot \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2\right]^{-1/2},$$

$$\psi = \arctg \frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \cdot \omega},$$

де коефіцієнти  $b_1$ ;  $b_2$ ;  $p_1$ ;  $p_2$ ;  $p_3$ ;  $p_4$  визначаються розрахунком з характеристичних рівнянь [8], а  $U_m$ ;  $A_1$ ;  $A_2$ ;  $A_4$ ;  $A_5$  визначаються рішенням системи рівнянь:

$$A_3 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + \quad (6)$$

$$+ p_4 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t} = p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2,$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \omega \cdot \cos \psi + p_3 \cdot A_4 + p_4 \cdot A_5 = \\ = p_1 \cdot A_1 \cdot e^{p_1 \cdot [T - \Delta t]} + p_2 \cdot A_2 \cdot e^{p_2 \cdot [T - \Delta t]}, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \sin \psi + A_4 + A_5 = \\ = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot [T - \Delta t]} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot [T - \Delta t]}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t + \psi) + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t} = \\ = A_1 + A_2, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_1 \cdot U_m}{R_{\phi} \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[b_1^2 \cdot \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2\right]^{-1/2} \times \\ \times [\cos \psi - \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi)] = -\frac{A_4}{p_3} \cdot (e^{p_3 \cdot \Delta t} - 1) - \\ - \frac{A_5}{p_4} \cdot (e^{p_4 \cdot \Delta t} - 1) - \frac{A_1}{p_1} \cdot (e^{p_1 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \\ - \frac{A_2}{p_2} \cdot (e^{p_2 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \Delta u_{усталене} \cdot T. \quad (10) \end{aligned}$$

В цілому, одержуємо систему 7 рівнянь з 7 невідомими:  $U_m$ ;  $A_1$ ;  $A_2$ ;  $A_4$ ;  $A_5$ ;  $t_1$ ;  $t_2$ , яка має 1 рішення в множині дійсних чисел для умов номінального режиму, параметри якого визначені в [8].

Унікальність побудови та рішення системи рівнянь високовольтного каскадного генератора узагальненого типу [8] полягає в тому, що за їх допомогою пошук його режимів іде у зворотному порядку – не від первинного джерела напруги, а від кінцевого результату його роботи – параметрів  $U_0$ ,  $I_0$  з урахуванням

значень параметрів елементів схеми, при цьому необхідне значення первинної напруги знаходиться в кінці розрахунку. Дана обставина дозволяє «синтезувати» режими каскадного генератора в залежності від необхідного кінцевого результату його роботи.

**Метою роботи** є пошук області граничних рішень системи рівнянь каскадного генератора високої напруги постійного струму, визначення умов при яких ще можлива робота каскадного генератора на заданих параметрах навантаження.

**Об'єкт дослідження** – високовольтний каскадний генератор живлення установки постійного струму з нелінійним навантаженням.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Дослідити, при яких мінімальних значеннях ємності розділового конденсатора  $C_1$  можлива робота каскадного генератора на задані номінальні параметри вихідної напруги.

2. Визначити при яких мінімальних значеннях ємності конденсаторів  $C_2 = C_3$  також можлива робота каскадного генератора на заданих параметрах вихідної напруги.

В роботі [5] визначені номінальні параметри навантаження каскадного генератора для високовольтної установки постійного струму еталонного типу:  $I_0 = 5$  мА,  $\bar{U}_n = 1$  кВ; 2 кВ; 3 кВ; 4 кВ; 5 кВ; 6 кВ; 7 кВ; 8 кВ; 9 кВ; 10 кВ; 20 кВ; 30 кВ; 40 кВ; 50 кВ; 60 кВ; 70 кВ; 80 кВ; 90 кВ; 100 кВ; 110 кВ; 120 кВ; 130 кВ; 140 кВ; 150 кВ; 160 кВ; 170 кВ; 180 кВ (27 номінальних режимів). Подільник напруги ПН має чотири значення вхідних номінальних напруг  $U_{вх.ном.ПН} = 180$  кВ; 90 кВ; 60 кВ; 30 кВ, для яких струм подільника напруги приймається рівним  $I_{ПН} = 2,5$  мА. Для інших 23 вхідних напруг подільника напруги його струм зменшується пропорційно вхідній напрузі. Конденсатор  $C_1$  має номінальну ємність 0,1 мкФ, конденсатори  $C_2 = C_3 = 0,072$  мкФ, опір фільтра  $R_\phi = 1,78$  МОм. В якості стабілітронів  $ST_1 \dots ST_i \dots ST_n$  використовуються стабілітрони Д818Д із значенням  $r_\delta = 22$  Ом; при цьому значення параметра  $r = 10$  кОм приймалось для режимів  $\bar{U}_n = 1 \dots 10$  кВ та  $r = 60$  кОм для режимів  $\bar{U}_n = 20 \dots 180$  кВ,  $R_\delta = n \cdot r_\delta$ , де  $n$  – кількість стабілітронів, відповідна кожному режиму  $\bar{U}_n$  виходячи із середнього значення напруги стабілізації Д818Д  $u_0 = 9$  В.

В роботі [8] окрім виведення теорії каскадного генератора узагальненого типу на основі рівнянь (1, 2), (6 – 10), проведені розрахунки 27 номінальних режимів установки ДЕТУ 08–04–99 [5], зокрема пульсацій її вихідної напруги та визначена напруга  $U_m$  джерела живлення необхідна для реалізації цих режимів, побудовані відповідні залежності. Показаний вплив додаткового навантаження схеми активними опорами конденсаторів  $C_2, C_3$ , який призводить до збільшення пульсацій вихідної напруги установки.

В даній роботі вперше досліджене питання граничних рішень системи рівнянь високовольтного каскадного генератора при варіюванні значень параметрів його складових елементів. Зокрема, поставлене питання, наскільки може бути зменшена ємність  $C_1$  (при зберіганні номінального значення ємностей  $C_2, C_3$  та незмінних параметрах навантаження установки

$\bar{U}_n, I_0$ ). Питання є актуальним, оскільки вартість високовольтних конденсаторів є високою та, в певній мірі, пропорційною їх ємності (при рівних значеннях робочої напруги).

**Дослідження впливу значення ємності конденсатора  $C_1$  на характеристики високовольтного каскадного генератора.** Для всіх 27 режимів високовольтного каскадного генератора при збереженні номінальних значень ємностей  $C_2 = C_3 = 0,072$  мкФ проводився (на основі багатоваріантних розрахунків) пошук мінімальних значень ємності  $C_1$ , при яких рішення системи рівнянь (1, 2), (6 – 10) ще відповідає умові задачі  $t_1 > 0$ . В табл. 1 наведені розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничному значенні ємності  $C_1$ .

Таблиця 1  
Розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничних значеннях ємності  $C_1$

$\bar{U}_n$ , кВ	$C_1$ , мкФ	$C_1/C_2$	$U_m$ , В	$\Delta_n$ , %	$\Delta t$ , мс
1	0,0119	0,1653	9531	0,334	5,05
2	0,0108	0,15	10647	0,193	5,001
3	0,00979	0,136	11809	0,149	5,06
4	0,00908	0,1261	12860	0,126	5,03
5	0,00839	0,1165	14043	0,112	5,04
6	0,00788	0,1094	15109	0,102	5,015
7	0,00738	0,1025	16298	0,0950	5,026
8	0,00697	0,0968	17445	0,0891	5,021
9	0,00659	0,0915	18627	0,0841	5,0414
10	0,00629	0,0874	19769	0,0806	5,04
20	0,00445	0,0618	31459	0,0673	5,03
30	0,00368	0,0511	42455	0,0515	5,001
40	0,00269	0,0374	51045	0,0346	4,98
50	0,00237	0,0329	61372	0,0297	4,93
60	0,00219	0,0304	70226	0,0264	4,88
70	0,00178	0,0247	79630	0,0211	4,88
80	0,00159	0,0221	91880	0,0192	4,995
90	0,00149	0,0207	102338	0,0178	5
100	0,00117	0,0163	110608	0,0137	4,99
110	0,00109	0,0151	120120	0,0127	4,98
120	0,00103	0,0143	130913	0,0119	4,995
130	0,000979	0,0136	140531	0,0113	4,98
140	0,000928	0,0129	151197	0,0107	4,985
150	0,000889	0,0123	160922	0,0102	4,98
160	0,000849	0,0118	171731	0,00973	4,991
170	0,000814	0,0113	182490	0,00934	5
180	0,000785	0,0109	192743	0,00899	5,005

В першій колонці табл. 1 наведені усереднені значення напруги навантаження генератора [кВ] від 1 до 180. В другій колонці наведені мінімальні розрахункові значення ємності  $C_1$  каскадного генератора [мкФ]. В третій колонці представлені відношення

визначених значень ємності  $C_1$  до значення ємності  $C_2 = C_3 = 0,072$  мкФ. Також представлені розрахункові значення напруги джерела живлення  $U_m$ , коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  [8] та розрахункове значення часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Порівнюючи одержані дані (табл. 1) з аналогічними даними розрахунків номінального режиму установки [8], слід відмітити значне зростання значення напруги джерела живлення  $U_m$  та проміжку часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ , при майже рівних значеннях коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  (див. рис. 3 – 5).

Аналогічно були проведені дослідження впливу граничних значень ємностей  $C_2, C_3$  при номінальному значенні ємності  $C_1 = 0,1$  мкФ (див. нижче).

**Дослідження впливу значення ємностей конденсаторів  $C_2, C_3$  на характеристики високовольтного каскадного генератора.** Для всіх 27 режимів високовольтного каскадного генератора при збереженні номінального значення ємності  $C_1$  проводиться пошук мінімальних значень ємностей  $C_2, C_3$  (які між собою рівні), при яких рішення системи рівнянь (1, 2), (6 – 10) ще відповідає умові задачі  $t_1 > 0$ .

В табл. 2 наведені розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничних значеннях ємностей  $C_2 = C_3$ .

Таблиця 2

Розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничному значенні ємності  $C_2$

$\bar{U}_n$ , кВ	$C_2$ , мкФ	$C_2/C_1$	$U_m$ , В	$\Delta_n$ , %	$\Delta t$ , мс
1	0,0118	0,118	7050	2,035	5,75
2	0,0106	0,106	7853	1,463	5,58
3	0,00976	0,0976	8656	1,273	5,53
4	0,00904	0,0904	9458	1,178	5,1
5	0,00836	0,0836	10261	1,120	5,04
6	0,00784	0,0784	11074	1,158	5,02
7	0,00735	0,0735	11887	1,185	5,03
8	0,00696	0,0696	12700	1,206	5,02
9	0,00654	0,0654	13512	1,221	5,04
10	0,00591	0,0591	14325	1,234	5,4
20	0,00401	0,0401	22987	2,977	5,1
30	0,00301	0,0301	31649	3,558	5,1
40	0,00141	0,0141	40311	3,849	5,7
50	0,000711	0,00711	48973	4,023	6,4
60	0,000317	0,00317	56969	3,780	6,5
70	0,000148	0,00148	66964	3,606	4,88
80	0,0000783	0,000783	77959	3,476	5
90	0,0000376	0,000376	85954	3,375	5
100	0,0000162	0,000162	95949	3,294	4,99
110	0,0000112	0,000112	103944	3,227	4,98
120	0,0000854	0,000854	112940	3,172	5
130	0,0000535	0,000535	122935	3,125	4,98
140	0,0000323	0,000323	129930	3,085	4,99
150	0,0000103	0,000103	139925	3,050	4,98
160	0,00000673	0,0000673	148920	3,020	4,99
170	0,00000414	0,0000414	157916	2,993	5
180	0,00000235	0,0000235	165911	2,969	4,99

В першій колонці табл. 2 наведені усереднені значення напруги навантаження генератора [кВ] від 1 до 180. В другій колонці наведені мінімальні розрахункові значення ємності  $C_2$  ( $C_3$ ) каскадного генератора [мкФ]. В третій колонці представлені відношення визначених значень ємності  $C_2 = C_3$  до значення ємності  $C_1 = 0,1$  мкФ. Також представлені розрахункові значення напруги джерела живлення  $U_m$ , коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  [8] та розрахункове значення часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Порівнюючи одержані дані (табл. 2) з аналогічними даними розрахунків номінального режиму установки [8], слід відмітити також значне зростання значення напруги джерела живлення  $U_m$  та проміжку часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ , при значному зростанні (в десятки разів) значення коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_n$ . Дані табл. 1, 2 представлені далі на рис. 3 – 5.

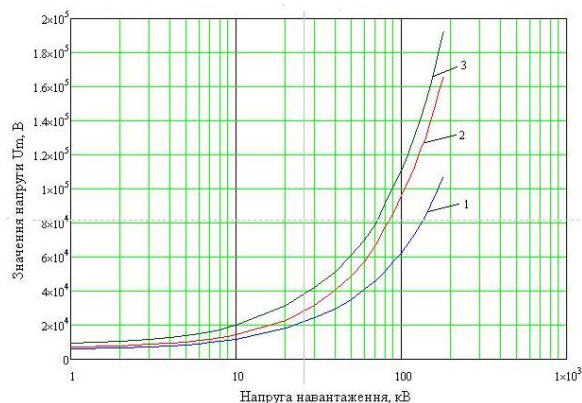


Рис. 3. Залежність напруги  $U_m$  джерела живлення від напруги навантаження  $\bar{U}_n$  в діапазоні 1...180 кВ, при розрахункових значеннях: 1 – номінальні значення ємностей  $C_1, C_2, C_3$ ; 2 – граничні значення ємностей  $C_2, C_3$ ; 3 – граничні значення ємності  $C_1$

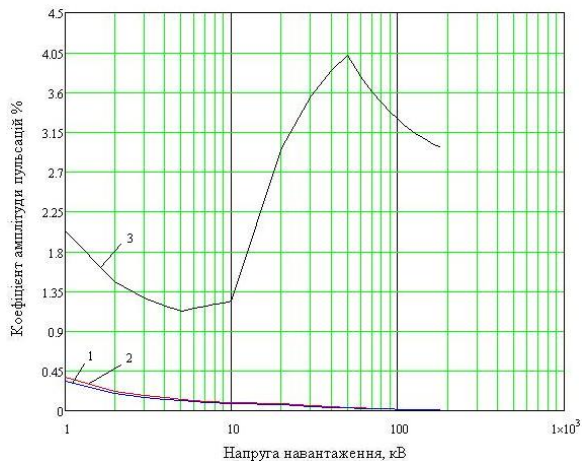


Рис. 4. Залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  від напруги навантаження  $\bar{U}_n$  в діапазоні 1...180 кВ при умовах: 1 – граничні значення ємності  $C_1$ ; 2 – номінальні значення ємностей  $C_1, C_2, C_3$ ; 3 – граничні значення ємностей  $C_2, C_3$

Залежності, наведені на рис. 3 показують, що при граничних значеннях ємностей  $C_1, C_2$  ( $C_3$ ) значення напруги  $U_m$  джерела живлення значно зростає. В режимі  $\bar{U}_n = 1$  кВ значення напруги  $U_m = 7050$  В (крива 2) та  $U_m = 9531$  В (крива 3), що більше фактично на 15 % та 40 % відповідно, в порівнянні зі значенням  $U_m$  при но-

мінимальних ємностях  $C_1, C_2, C_3$ . В режимі  $\bar{U}_n = 180$  кВ зазначене зростання складає відповідно 35 % та 45 %.

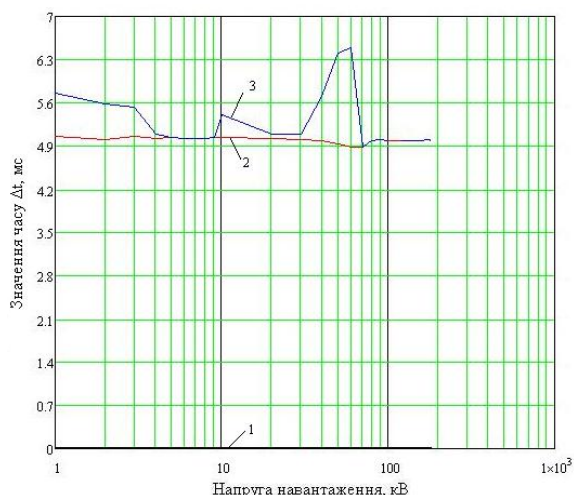


Рис. 5. Залежність часу  $\Delta t$  від напруги навантаження  $\bar{U}_n$  в діапазоні 1...180 кВ при умовах:  
1 – номінальні значення ємностей  $C_1, C_2, C_3$ ;  
2 – граничні значення ємності  $C_1$ ;  
3 – граничні значення ємностей  $C_2, C_3$

Дані представлені на рис. 4 показують, що при граничних значеннях ємності  $C_1$  (крива 1) коефіцієнт амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  фактично не змінюється в порівнянні з номінальними значеннями ємностей  $C_1, C_2, C_3$ . Але, при граничних значеннях ємностей  $C_2, C_3$  (крива 2) коефіцієнт амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  значно зростає (десятки разів) в порівнянні з номінальними значеннями ємностей  $C_1, C_2, C_3$ . Дана поведінка кривих (рис. 4) пояснюється тим, що ємності  $C_2, C_3$  фактично утворюють разом з активним опором  $R_\phi$  фільтр пульсацій. Тому при зменшенні  $C_2, C_3$  амплітуда пульсацій різко зростає.

Залежності, наведені на рис. 5 показують, що при граничних значеннях ємностей  $C_1, C_2$  ( $C_3$ ) значення часу  $\Delta t$  різко збільшується (десятки разів) в порівнянні з номінальними значеннями  $C_1, C_2, C_3$ . При граничних значеннях ємності  $C_1$  (крива 2) величина  $\Delta t$  коливається в проміжку від 4,98 мс до 5,06 мс, а при граничних значеннях ємностей  $C_2, C_3$  відповідно від 4,88 мс до 6,5 мс.

Як приклад, були проведені розрахунки для комплексного зменшення граничних значень всіх ємностей каскадного генератора  $C_1, C_2, C_3$  в режимах  $\bar{U}_n = 1$  кВ:  $C_1 = 0,0261$  мкФ,  $C_2 = C_3 = 0,0181$  мкФ, при цьому одержано  $U_m = 7948$  В,  $\Delta_n = 1,38$  %. Для  $\bar{U}_n = 180$  кВ:  $C_1 = 0,00715$  мкФ,  $C_2 = C_3 = 0,000161$  мкФ одержано  $U_m = 90674$  В,  $\Delta_n = 7,788$  %. З аналізу одержаних результатів можна відзначити, що значення напруги  $U_m$  джерела живлення незначно зростає, а коефіцієнт амплітуди пульсацій  $\Delta_n$  різко збільшується.

#### Висновки.

1. Знайдене в попередній публікації [8] у загальному випадку нелінійного навантаження високовольтного каскадного джерела постійного струму аналітичне рішення для його вихідної напруги та її нелінійної пульсації придатне не тільки для розрахунків номінальних режимів, але і для граничних умов вибору його структурних елементів. Це дозволяє проводити

багатоваріантні та оптимізаційні розрахунки умов роботи та характеристик високовольтних каскадних генераторів постійної напруги, при збереженні вихідних параметрів їх навантаження  $\bar{U}_n, I_0$ .

2. Проведені розрахунки свідчать, що прийнятні для практичних застосувань характеристики високовольтних каскадних генераторів можуть бути досягнуті при суттєвому зменшенні значень їх складових ємностей, отже і при суттєвому зменшенні їх вартості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Cockcroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1932. – Vol. 136. – № 830. – pp. 619-630.
- Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Х.: Торнадо, 2005. – 930 с.
- Кастров М.Ю. Полупроводниковые широкодиапазонные стабилизаторы напряжения переменного тока // *Электросвязь*. – 2005. – № 10. – С. 20-22.
- Альбертинский Б.С., Свинын М.П. Каскадные генераторы. – М.: Атомиздат, 1980. – 210 с.
- Бржезицький В.О., Вендичанський Р.В., Десятов О.М., Гаран Я.О. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2014. – № 1. – С. 7-13.
- Северин В.П., Нікуліна О.М., Ахтирцев М.І. Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – № 33. – С. 19-24.
- Воробьев А.А., Воробьев Г.А. и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 583 с.
- Бржезицький В.О., Десятов О.М., Сулейманов В.М., Хомініч В.І. Аналіз пульсацій високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – № 1(21). – С. 56-61.

#### REFERENCES

- Cockcroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1932, Vol. 136, no.830, pp. 619-630. doi: 10.1098/rspa.1932.0107.
- Brzhezytskyi V.O., Isakov A.V., Rudakov V.V. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh* [Engineering and Electrophysics high voltages]. Kharkiv, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
- Castrov M.J. Semiconductor wide-range AC voltage stabilizers. *Electrosvyaz – The Electrosvyaz Magazine*, 2005, no.10, pp. 20-22. (Rus).
- Albertinsky B.S., Svinin M.P. *Kaskadnye generatory* [Cascade generators]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980, p. 210. (Rus).
- Brzhezytskyi V.O., Vendychanskyi R.V., Desiatov O.M., Haran I.A. Rationale diodes and modes of supply of standard units of high voltage direct current. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Science news of NTUU «KPI»*, 2014, no.1, pp. 7-13. (Ukr).
- Severin V.P., Nikulina O.M., Akhtyrtev M.I. Mathematical and simulation software for single-voltage pulse generator. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.33, pp. 19-24. (Ukr).

7. Vorobyov A.A., Vorobyov G.A. *Vysokhovoltnoe ispytatel'noe oborudovanie i izmereniya* [High voltage test equipment and measuring]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960. 583 p. (Rus).

8. Brzhezitsky V.O., Desyatov O.M., Suleimanov V.M., Hominich V.I. Analysis of high voltage cascade generator pulsations of a direct current. *Tekhnologichnii audit i rezervi virobnictva – Technology audit and production reserves*, 2015. no.1(21), pp. 56-61. (Ukr). doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37219>.

*Поступила (received) 26.01.2015*

Бржезицький Володимир Олександрович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Десятов Олег Михайлович<sup>1</sup>, асистент,  
Козюра Володимир Володимирович<sup>1</sup>, здобувач,  
<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
03056, Київ, пр. Перемоги, 37,  
тел/phone +38 044 4068235,  
e-mail: brzhezitsky@mail.ru; oleg\_desyatov@ukr.net

V.O. Brzhezitsky<sup>1</sup>, O.M. Desyatov<sup>1</sup>, V.V. Kozyura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

**Limit solutions of equations of a DC high-voltage cascade generator.**

*In the paper the issue of calculating the high voltage cascade mode oscillator with a nonlinear load using the analytical method under different conditions of selection values of its components is presented. The peculiarity of the method of the study is that during multivariate calculations output parameters load generator remain unchanged. For high-voltage cascade direct current power found conditions under which can be significantly reduced high capacity capacitors cascade generator. The calculations show that acceptable for practical applications of high-voltage characteristics of cascade generators can be achieved with substantial reduction of the volume of their constituents, and thus substantial decline in their value. References 8, table 2, figures 5.*

**Key words:** cascade high-voltage source, an analytical method, amplitude of voltage pulsation, nonlinear loading, thresholds container.