

SMART GRID КАК ИННОВАЦИОННАЯ БАЗА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В.В. Козырский, В.В. Каплун

Рассмотрены вопросы, касающиеся будущего развития энергетики, внедрению технологий Smart Grid в связи с ростом распределенной генерации.

Ключевые слова: Smart Grid, распределенная генерация, развитие энергетики, GRID-технологии

УДК 621.314.54

АНАЛІЗ ПУЛЬСАЦІЙ СТРУМУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

В. О. Бржезицький, доктор технічних наук

*О. М. Десятов, аспірант**

Я. О. Гаран, інженер

А. А. Бабічева, студентка

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

e-mail: brzhezitsky@mail.ru

Проведено дослідження робочих режимів високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням за допомогою аналітичного методу. Для каскадного високовольтного джерела постійного струму здійснено аналітичне дослідження розподілення його напруги у часі та визначено її нелінійну пульсацію. Проведено дослідження залежності амплітуди пульсацій струму та напруги установки.

Ключові слова: каскадне джерело високої напруги, аналітичний метод, амплітуда пульсацій струму, нелінійне навантаження

Каскадні генератори – одні з найрозповсюдженіших джерел високої і надвисокої постійної напруги. Здебільшого вони використовуються для електроживлення різної електрофізичної апаратури, а особливо для високовольтних прискорювачів різних типів. Каскадний генератор складається, зазвичай, з 4–10 каскадів. Спеціальні схеми включення з використанням випрямлячів і конденсаторів забезпечують збільшення напруги в кожному каскаді (порівняно з попереднім) на величину подвоєної амплітудної напруги високовольтного трансформатора, підключеного до першого каскаду.

Каскадні генератори широко застосовуються в техніці високих напруг, при випробуваннях високовольтного обладнання, а також у прискорювальній техніці для отримання іонів з енергією до 3–4 МеВ і вище [12].

Вперше каскадний генератор був побудований в 1932 Дж. Кокрофтом і Е. Уолтоном, які з його допомогою прискорювали іони до високих енергій [12].

Також постійну високу напругу одержують за допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, основними елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік і струмообмежувальні резистори [11].

В останній час високовольтні каскадні генератори знаходять застосування в технологіях обробки сільгосппродукції, харчовій промисловості, в промислових електрофільтрах вугільних електростанцій, для екологічного очищення відходів тощо [3–5, 8–10].

Характерною ознакою каскадних генераторів є наявність пульсацій напруги на виході установки. В ряді публікацій проведено дослідження залежності форми та амплітуди пульсацій напруги [1, 6], але в такого роду установках присутні також пульсації струму, що впливають на їх характеристики, які раніше не досліджувалися. Тому, аналіз їхнього впливу для високовольтних каскадних установок є актуальним.

Мета досліджень – аналіз пульсацій струму високовольтного каскадного генератора постійної напруги та вивчення його впливу на характеристики таких установок.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз пульсацій струму в роботі здійснено за допомогою розробленого авторами аналітичного методу дослідження високовольтного каскадного генератора постійної напруги [2].

Функціональна схема електроживлення установки подвоєння високої напруги постійного струму узагальненого типу за [2] наведена 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 надходить 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 $R_{\Gamma H}$ (опір $R_{\Gamma H}$ також моделює можливе інше навантаження генератора). Уведення стабілітронів у схему установки (див. рис.1) пояснюється необхідністю зменшення пульсацій та, з другого боку, підвищення точності вимірювань високої напруги. Додатково до схеми установки [7] у схему рис.1 введені навантаження R_2, R_3 .

Вольт-амперна характеристика (як приклад, стабілітрона Д818Д [7]) наведена на рис. 2. Її лінеаризований вираз запишемо у вигляді: $u_{st}(i) = U_0 + r_\partial \cdot (i - I_0)$, де r_∂ – диференціальний опір стабілітрона.

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

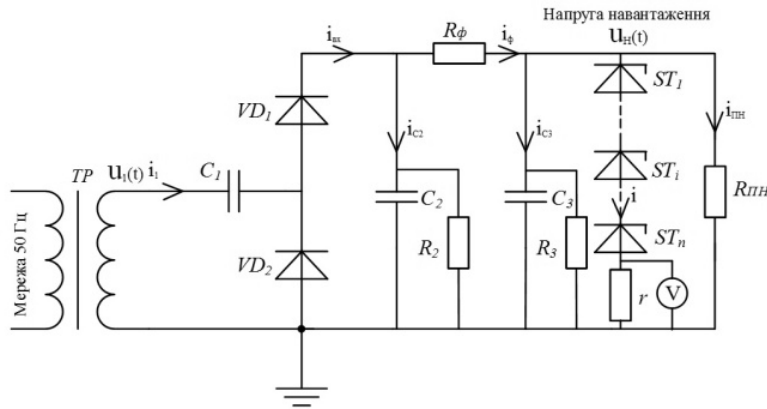


Рис. 1. Функціональна схема живлення установки високої напруги узагальненого типу

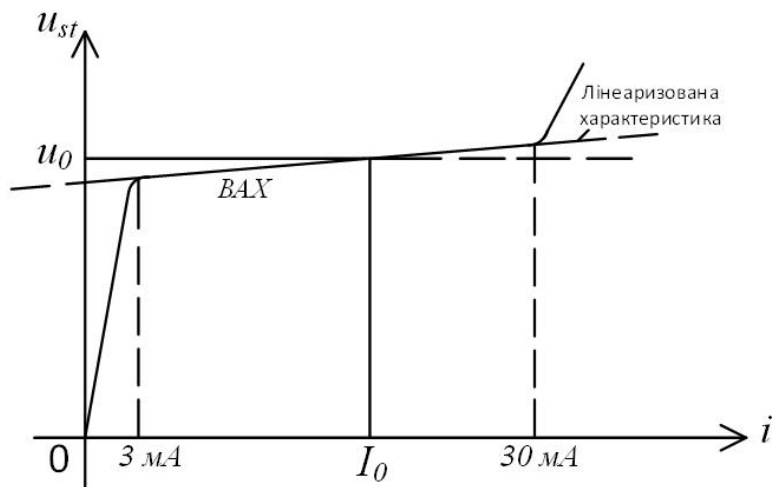


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д

Виділяючи в $u_H(t)$ пульсацію напруги $\Delta u(t) = u_H(t) - U_0 - I_0 \cdot r$ та проводячи перетворення, в [2] вперше одержана система рівнянь, яка описує процес у схемі каскадного генератора узагальненого типу.

У проміжку часу $0 \leq t \leq T$, де T – період напруги $T = 2\pi/\omega$, у 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 протягом часу $T - \Delta t$, де $\Delta t = t_2 - t_1$. Система рівнянь, яка описує усталений періодичний процес у схемі рис. 1 має вигляд [2]:

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

де

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

де

$$\begin{aligned}
X_2 &= C_3 R_\phi \cdot \left[-\omega^2 A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + p_3^2 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4^2 A_5 e^{p_4 \Delta t} \right] + \\
&+ \left(1 + \frac{R_\phi}{R_{III}} + \frac{R_\phi}{R_3} + \frac{R_\phi}{R_\partial + r} \right) \left[\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} \right]; \\
\Delta u_{усталене} &= - \frac{(U_0 + I_0 r) \cdot \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_\phi}{R_2 R_3} + \frac{R_\phi}{R_2 R_{III}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{III}} \right] + I_0 \left(1 + \frac{R_\phi}{R_2} \right)}{\frac{1}{R_2} + \frac{R_\phi}{R_2 R_3} + \frac{R_\phi}{R_2 R_{III}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{III}} + \frac{1}{R_\partial + r} \cdot \left(1 + \frac{R_\phi}{R_2} \right)}. \tag{3}
\end{aligned}$$

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

$$\Delta u_s(t) = A_3 \sin(\omega(t - t_1) + \psi) + A_4 e^{p_3(t-t_1)} + A_5 e^{p_4(t-t_1)} + \Delta u_{усталене}, \tag{4}$$

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

$$\Delta u_{III}(t) = A_1 e^{p_1(t-t_2)} + A_2 e^{p_2(t-t_2)} + \Delta u_{усталене}, \tag{5}$$

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

$\psi = \arctg \frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \cdot \omega}$, де коефіцієнти b_1 ; b_2 ; p_1 ; p_2 ; p_3 ; p_4 визначаються

розрахунком із характеристичних рівнянь [2], а U_m ; A_1 ; A_2 ; A_4 ; A_5 визначаються рішенням системи рівнянь:

$$A_3 \omega \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = p_1 A_1 + p_2 A_2, \tag{6}$$

$$A_3 \omega \cos \psi + p_3 A_4 + p_4 A_5 = p_1 A_1 e^{p_1 [T - \Delta t]} + p_2 A_2 e^{p_2 [T - \Delta t]}, \tag{7}$$

$$A_3 \sin \psi + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1 [T - \Delta t]} + A_2 e^{p_2 [T - \Delta t]}, \tag{8}$$

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

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

У цілому, одержуємо систему із семи рівнянь, що включає сім невідомих: U_m ; A_1 ; A_2 ; A_4 ; A_5 ; t_1 ; t_2 . Ця система має одне рішення в множині дійсних чисел для умов номінального режиму, параметри якого визначені в [2].

Унікальність побудови та рішення системи рівнянь високовольтного каскадного генератора узагальненого типу [2] 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 U_m знаходиться в кінці розрахунку. Це дозволяє “синтезувати” режими каскадного генератора залежно від необхідного кінцевого результату та умов його роботи.

Результати досліджень. *Розрахунок режимів джерела живлення зразка установки високої напруги постійного струму.*

Наведена на рис. 1 функціональна схема живлення генератора високої напруги постійного струму має параметри, що фактично відповідають установці державного еталона високої напруги ДЕТУ 08-04-99 в режимах номінальних напруг \bar{U}_n від 1 до 180 кВ [7].

На рис. 1 позначені:

C_1 – розділовий конденсатор (0,1 мкФ);

C_2 , C_3 – зарядний та фільтровий конденсатори (0,072 мкФ);

R_ϕ – опір фільтра (1,78 МОм);

VD_1 , VD_2 – високовольтні діоди;

$ST_1 \dots ST_i \dots ST_n$ – стабілітрони типу Д818Д;

ПН – омичний подільник напруги (в загальному випадку – активний опір, що моделює навантаження генератора).

Стабілітрони Д818Д визначають вибір стабілізованого струму установки $I_0 = 5$ мА для 27 значень вхідних номінальних напруг на навантаженні \bar{U}_n , згідно з табл. 1. Подільник напруги ПН має чотири значення вхідних номінальних напруг $U_{\text{вх.ном.ПН}}$: 180 кВ; 90 кВ; 60 кВ; 30 кВ, для яких струм подільника напруги розраховується рівним $I_{\text{ПН}} = 2,5$ мА. Для інших 23 вхідних напруг подільника напруги \bar{U}_n його струм зменшується пропорційно вхідній напрузі.

У роботі [7] значення коефіцієнта амплітуди пульсацій напруги визначалося за допомогою програмного забезпечення Multisim при заміні

стабілітронів еквівалентними резисторами $r_{\text{екв}} = \frac{u_0}{I_0}$. У цій роботі були

проведені аналогічні розрахунки за рішенням одержаної системи рівнянь (1, 2, 6-10) аналітичним методом для значення параметра $r = \frac{\bar{U}_H}{I_0}$ при $R_0 = 0$, яке

визначалося відповідним для кожного режиму. За результатами аналітичного розрахунку в цій роботі також визначався коефіцієнт амплітуди пульсацій напруги для схеми джерела високої напруги (див. рис. 1). Порівнявши між собою отримані результати аналітичного розрахунку та результати [7], одержані з використанням Multisim, можна зазначити, що вони фактично

збігаються. В табл. 1 наведено результати розрахунків коефіцієнта амплітуди пульсацій напруги та коефіцієнта амплітуди пульсацій струму аналітичним методом для ланки стабілітронів (рис. 1) (при заміні їх еквівалентними резисторами) для випадку $R_2 \rightarrow \infty$, $R_3 \rightarrow \infty$ (що відповідає номінальному режиму установки), за формулами $\Delta_{П(н)} = \frac{(\Delta u_1 - \Delta u_2)}{2 \cdot U_0} 100\%$, $\Delta_{П(см)} = \frac{(\Delta_{см1} - \Delta_{см2})}{2 \cdot I_0} 100\%$, де

Δu_1 , Δu_2 , $\Delta_{см1}$, $\Delta_{см2}$ – відповідно максимальні позитивні та негативні амплітуди пульсацій напруги та струму.

**1. Розраховані значення напруги U_m ,
коефіцієнта амплітуди пульсацій напруги $\Delta_{П(н)}$ та коефіцієнта
амплітуди пульсацій струму $\Delta_{П(см)}$ для 27 режимів живлення
установки (при заміні стабілітронів резисторами)**

| $\bar{U}_H, \text{В}$ | $U_m, \text{В}$ | $\Delta_{П(н)}, \%$ | $\Delta_{П(ст)}, \%$ | $\bar{U}_H, \text{В}$ | $U_m, \text{В}$ | $\Delta_{П(н)}, \%$ | $\Delta_{П(ст)}, \%$ |
|-----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 1000 | 5939,39 | 1,244 | 1,244 | 60000 | 40995,59 | 0,0333 | 0,0333 |
| 2000 | 6577,69 | 0,6463 | 0,6463 | 70000 | 45920,41 | 0,0265 | 0,0265 |
| 3000 | 7216,07 | 0,4432 | 0,4432 | 80000 | 51725,99 | 0,0241 | 0,0241 |
| 4000 | 7854,52 | 0,34 | 0,34 | 90000 | 57531,71 | 0,0223 | 0,0223 |
| 5000 | 8493,02 | 0,2775 | 0,2775 | 100000 | 61871,51 | 0,0171 | 0,0171 |
| 6000 | 9131,58 | 0,2357 | 0,2357 | 110000 | 67531,04 | 0,0159 | 0,0159 |
| 7000 | 9770,18 | 0,2057 | 0,2057 | 120000 | 73190,65 | 0,0149 | 0,0149 |
| 8000 | 10408,83 | 0,1832 | 0,1832 | 130000 | 78850,32 | 0,0141 | 0,0141 |
| 9000 | 11047,51 | 0,1656 | 0,1656 | 140000 | 84510,03 | 0,0133 | 0,0133 |
| 10000 | 11686,23 | 0,1515 | 0,1515 | 150000 | 90169,78 | 0,0127 | 0,0127 |
| 20000 | 18074,87 | 0,0875 | 0,0875 | 160000 | 95829,55 | 0,0121 | 0,0121 |
| 30000 | 24465,06 | 0,066 | 0,066 | 170000 | 101489,36 | 0,0116 | 0,0116 |
| 40000 | 29092,73 | 0,0443 | 0,0443 | 180000 | 107149,18 | 0,0112 | 0,0112 |
| 50000 | 35044,03 | 0,0377 | 0,0377 | | | | |

Були також проведені розрахунки за рішенням системи рівнянь для значень параметрів $r=10$ кОм для режимів $\bar{U}_H=1...10$ кВ та $r=60$ кОм для режимів $\bar{U}_H=20...180$ кВ. Значення r_δ визначалося згідно з [2] рівним 22 Ом для кожного стабілітрона, а $R_\delta=n r_\delta$, де n – кількість стабілітронів, відповідна кожному режиму \bar{U}_H , що визначена, виходячи із середнього значення напруги стабілізації Д818Д $u_0=9$ В. За результатами розрахунків визначався коефіцієнт амплітуди пульсацій напруги $\Delta_{П(н)}$ та коефіцієнт амплітуди пульсацій струму $\Delta_{П(см)}$ для ланки стабілітронів схеми (рис. 1), які наведені в табл. 2.

**2. Розраховані значення напруги U_m ,
коефіцієнта амплітуди пульсацій напруги $\Delta_{П(н)}$ та коефіцієнта
амплітуди пульсацій струму $\Delta_{П(см)}$ для 27 режимів живлення
установки з урахуванням параметрів стабілітронів**

| $\bar{U}_H, \text{В}$ | $U_m, \text{В}$ | $\Delta_{П(н)}, \%$ | $\Delta_{П(ст)}, \%$ | $\bar{U}_H, \text{В}$ | $U_m, \text{В}$ | $\Delta_{П(н)}, \%$ | $\Delta_{П(ст)}, \%$ |
|-----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 1000 | 5971,38 | 0,3814 | 6,121 | 60000 | 41174,21 | 0,0323 | 1,873 |
| 2000 | 6609,63 | 0,2175 | 5,95 | 70000 | 46094,53 | 0,0257 | 1,56 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|--------|-------|--------|-----------|--------|-------|
| 3000 | 7248,03 | 0,1692 | 5,852 | 80000 | 51900,12 | 0,0235 | 1,472 |
| 4000 | 7886,47 | 0,1442 | 5,831 | 90000 | 57705,85 | 0,0217 | 1,398 |
| 5000 | 8524,96 | 0,1285 | 5,781 | 100000 | 62041,26 | 0,0167 | 1,098 |
| 6000 | 9163,51 | 0,1174 | 5,71 | 110000 | 67700,81 | 0,0156 | 1,042 |
| 7000 | 9802,11 | 0,1089 | 5,623 | 120000 | 73360,42 | 0,0146 | 0,993 |
| 8000 | 10440,75 | 0,1021 | 5,525 | 130000 | 79020,09 | 0,0138 | 0,951 |
| 9000 | 11079,43 | 0,0963 | 5,419 | 140000 | 84679,8 | 0,0131 | 0,913 |
| 10000 | 11718,15 | 0,0915 | 5,308 | 150000 | 90339,55 | 0,0125 | 0,88 |
| 20000 | 18266,51 | 0,0802 | 2,944 | 160000 | 95999,33 | 0,0120 | 0,849 |
| 30000 | 24656,73 | 0,0621 | 2,793 | 170000 | 101659,13 | 0,0115 | 0,822 |
| 40000 | 29271,22 | 0,0422 | 2,141 | 180000 | 107318,96 | 0,0111 | 0,798 |
| 50000 | 35222,53 | 0,0363 | 1,992 | | | | |

Результати розрахунків таблиць 1 та 2 подано у вигляді залежностей відповідних коефіцієнтів амплітуди пульсацій на рис. 3.

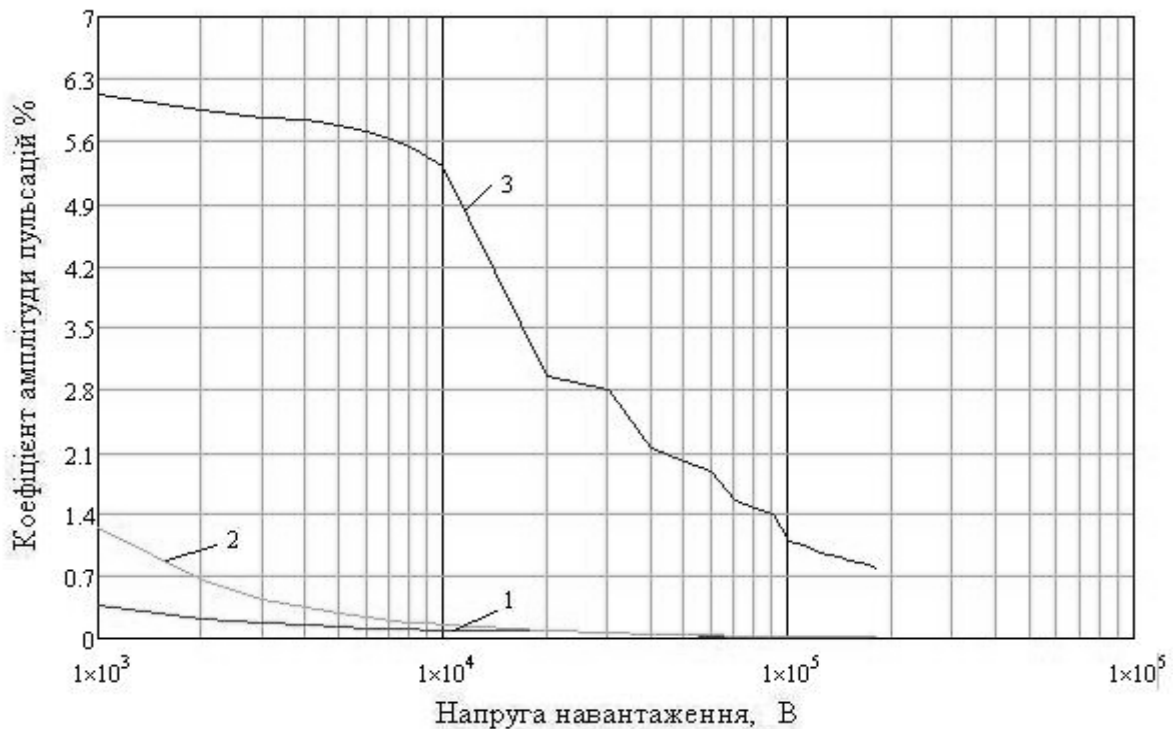


Рис. 3. Залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій струму та напруги від напруги навантаження \bar{U}_n в діапазоні 1–180 кВ:

1 – коефіцієнт амплітуди пульсацій напруги, одержаний з урахуванням параметрів стабілітронів; 2 – коефіцієнт амплітуди пульсацій напруги та струму для стабілітронів, одержаний при їх заміні резисторами; 3 – коефіцієнт амплітуди пульсацій струму стабілітронів

Залежності, наведені на рис.3, показують, що пульсації струму в установці з нелінійним навантаженням стабілітронів є максимальними (пульсації струму, крива 3, перевищують у 16–72 рази пульсації напруги, крива 1).

Разом із тим, у випадку заміни стабілітронів резисторами, пульсації напруги (або струму) перевищують відповідні пульсації напруги у 3,26 разів (при $\bar{U}_n = 1$ кВ) та у 1,01 раз (при $\bar{U}_n = 180$ кВ), див. криві 2 та 1 на рис. 3.

Отже, навантаження схеми каскадного генератора високої напруги стабілітронами, дозволяє суттєво знизити амплітуду пульсацій напруги при одночасному різкому збільшенні амплітуди пульсацій струму.

Висновки

1. Одержані результати показують, що запропонований раніше авторами [2] аналітичний метод дозволяє здійснювати високоточні розрахунки режимів напруги та струму високовольтних каскадних генераторів із нелінійним навантаженням, що визначають їх якісні характеристики як джерел живлення відповідних технологічних установок.

2. При застосуванні запропонованого аналітичного методу, розраховані параметри живлення високовольтного каскадного генератора постійної напруги з нелінійним навантаженням. У номінальному режимі робочої напруги установки 1 кВ амплітуда пульсації струму фактично складає 6 % (за проведеними розрахунками – 6,121 %), а в режимі 180 кВ – 0,798 %. Коефіцієнт пульсацій струму $\Delta_{\Gamma(cm)}$ суттєво залежить від режиму установки високої напруги та її навантаження.

3. При певній зміні значень активних елементів схеми живлення установки високої напруги постійного струму та при введенні в її схему нелінійних елементів можна цілеспрямовано здійснювати регулювання коефіцієнта амплітуди пульсацій її вихідної напруги (або струму).

Список літератури

1. Альбертинский Б.С. Каскадные генераторы / Б.С. Альбертинский, М.П. Свинын. – М. : Атомиздат, 1980. – 210 с.
2. Аналіз пульсацій високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму / В.О. Бржезицький, О.М. Десятов, В.М. Сулейманов, В.І. Хомініч // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 1. – С. 56–61.
3. Бударин М.В. Создание высокоэффективных озонаторных установок производительностью до 5 кг/ч / М.В. Бударин, В.И. Пригожин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2004. – № 11. – С. 38–41.
4. Гроховский В. А. Исследования по установлению срока годности рыбы холодного бездымного электрокопчения / В. А. Гроховский // Вестник МГТУ. – 2012. – № 1. – С. 35–44.
5. Дайнеко В.И. Газоочистка при утилизации твердых бытовых отходов / В.И. Дайнеко, Д.А. Киссин, Н.В. Степанов // Вестник СевГТУ. – 2003. – № 48. – С. 189–193.
6. Кастров М.Ю. Полупроводниковые широкодиапазонные стабилизаторы напряжения переменного тока / М. Ю. Кастров // Научно-технический журнал «Электросвязь». – 2005. – № 10. – С. 20–22.
7. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму / В.О. Бржезицький, Р.В. Вендичанський, О.М. Десятов, Я.О. Гаран // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 1. – С. 7–13.

8. Опыт применения озоновых технологий при производстве инкубационных яиц / Е. В. Корса-Вавилова, А. К. Османян, А. Л. Штеле [та ін.] // Птица и птицепродукты. – 2011. – № 1. – С. 42–45.

9. Пирогов Е.Н. Современные технологии водоподготовки / Е. Н. Пирогов, Ш. А. Давлетьяров // Экологические проблемы индустриальных мегаполисов: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. / ДонНТУ, 2009. – С. 221–225.

10. Разработка комплекса безреагентной очистки воды / В.А. Хан, М.А. Лернер, В.Ф. Мышкин, А.А. Цхе // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 2. – С. 4–17.

11. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посібник / [В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков та ін.]; за ред. В. О. Бржезицького, В. М. Михайлова. – Х.: Торнадо, 2005. – С. 514–580.

12. Cockcroft, J. D. Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions / J. D. Cockcroft, E. T. S. Walton // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. - 1932. - Vol. 136, № 830. - P. 619–630.

АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.А. Бржезицкий, О.М. Десятов, Я.А. Гаран, А.А. Бабичева

Проведено исследование рабочих режимов высоковольтного каскадного генератора с нелинейной нагрузкой с помощью аналитического метода. Для каскадного высоковольтного источника постоянного тока осуществлено аналитическое исследование изменения напряжения во времени и определена его нелинейная пульсация. Проведено исследование зависимости амплитуды пульсаций тока и напряжения установки.

Ключевые слова: каскадный источник высокого напряжения, аналитический метод, амплитуда пульсаций тока, нелинейная нагрузка

ANALYSIS OF THE CURRENT RIPPLE OF CASCADE GENERATOR HIGH DC VOLTAGE

V. Brzhezitsky, O. Desyatkov, J. Garan, A. Babicheva

In the article the issue of modes calculation for the high-voltage cascade generator with nonlinear loading by means of an analytical method is resolved. For a cascade high-voltage source of a direct current the analytical solution for its pressure and a nonlinear pulsation is found. Research dependence of the amplitude ripple current.

Keywords: cascade high-voltage source, an analytical method, amplitude of voltage pulsation, nonlinear loading