

В. В. Кузнецов // Гірничі електромеханіка та автоматика. — Дніпропетровськ, 2010. — Вип. 85. — С. 113–118.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Стаття присвячена проблемам прийняття рішення про вибір пристроїв захисту асинхронних двигунів, що працюють в умовах неякісної електроенергії. Розглянуто комплексну модель асинхронного двигуна, що дозволяє оцінювати енергетичні показники, а також тепловий стан на основі імовірнісних характеристик показників якості електроенергії, що дозволяє обґрунтувати економічну доцільність використання запропонованих заходів.

Ключові слова: електромережі промислових підприємств, неякісна електроенергія, асинхронний двигун, показники якості електроенергії.

Кузнецов Виталий Вадимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и электропривода, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: wit_jane2000@mail.ru.

Кузнецов Віталій Вадимович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та електропривода, Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, Україна.

Kuznetsov Vitalii, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: wit_jane2000@mail.ru

УДК 621.314.54

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37219

**Бржезицький В. О.,
Десятов О. М.,
Сулєйманов В. М.,
Хомініч В. І.**

АНАЛІЗ ПУЛЬСАЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті вирішене питання розрахунку режимів напруги високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням за допомогою аналітичного методу. Для каскадного високовольтного джерела постійного струму знайдено аналітичне рішення для його напруги та її нелінійної пульсації. Проведено дослідження залежності амплітуди пульсації від параметрів схеми генератора.

Ключові слова: каскадне джерело високої напруги, аналітичний метод, амплітуда пульсації напруги, нелінійне навантаження.

1. Вступ

Ряд електротехнічних пристроїв і технологічних процесів пов'язаний з використанням сильних електростатичних полів та енергії постійного струму високої напруги. До них належать пристрої прямого прискорення заряджених частинок, генератори, призначені для випробування ізоляції електроустаткування ЛЕП (ліній електропередач) постійного струму, блоки живлення радіотехнічних схем, промислових електрофільтрів, рентгенівських апаратів і томографів, установок магнітно-імпульсної обробки металів, електронно-іонної технології, зарядних пристроїв, емнісних нагромаджувачів енергії.

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 [1].

Актуальність запропонованої роботи полягає в тому, що в ній вперше побудована аналітична теорія високовольтних каскадних установок, яка дозволяє враховувати нелінійність параметрів та визначати форму і амплітуду пульсації їх вихідної напруги. Точне, аналітичне визначення даних факторів, особливо важливе для забезпечення якості технологічних процесів, побудованих з використанням подібних високовольтних установок.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вперше схема каскадних генераторів була запропонована Грейнахером в 1920 році [2], проте практичне застосування вони знайшли лише на початку 30-х років, коли виникла необхідність створення джерел надвисоких напруг для прискорювачів заряджених частинок. У 1932 р. Кокрофт і Уолтон опублікували опис емнісного каскадного генератора з послідовним живленням на напругу 700 кВ [3]. Відтоді такі установки зазвичай називають генераторами Кокрофта-Уолтона. Пульсації напруги на виході в таких генераторах виявилися вельми значними, іноді навіть за відсутності навантаження. Надалі з метою усунення цих недоліків було запропоновано декілька удосконалених каскадних генераторів даного типу. Певного зниження пульсації напруги вдалося домогтися, перейшовши до симетричних схем, запропонованих Гельперном [4]. До сьогоднішнього дня науковці вказують у своїх роботах про вплив пульсації напруги [5], але кінцевого рішення, за допомогою якого можна було б точно визначати значення амплітуди та форми пульсації не було знайдено.

Дослідження режимів високовольтних каскадних установок постійного струму звичайно виконуються наближеними методами [1, 6] у допущенні незмінності

їх параметрів у часі (лінійне наближення). Проте останнім часом у схемах таких установок використовують і нелінійні елементи, наприклад стабілітрони [7].

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — високовольтний генератор живлення установки постійного струму з нелінійним навантаженням.

Метою роботи є аналітичне дослідження режимів високовольтних джерел живлення установок постійного струму з урахуванням нелінійності характеристик елементів та визначення пульсацій їх напруги, які суттєво впливають на якість технологічних процесів, побудованих з використанням таких установок.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити аналітичний метод дослідження високовольтних установок постійного струму, який дасть змогу визначати значення максимальної напруги, форми та амплітуди пульсацій напруги в режимах роботи установок.

2. Встановити залежність коефіцієнта пульсацій від режиму установки високої напруги постійного струму та її навантаження.

4. Аналітичний метод дослідження високовольтних установок постійного струму

Функціональна схема електроживлення установки подвоєння високої напруги постійного струму у загальному випадку представлена на рис. 1. З виходу високовольтного підвищувального трансформатора ТР напруга $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ через розділовий конденсатор C_1 поступає на вхід каскада подвоєння напруги $VD_1; VD_2; C_2$, і далі через фільтр R_Φ ; 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 [7] (рис. 1) уведено навантаження R_2, R_3 .

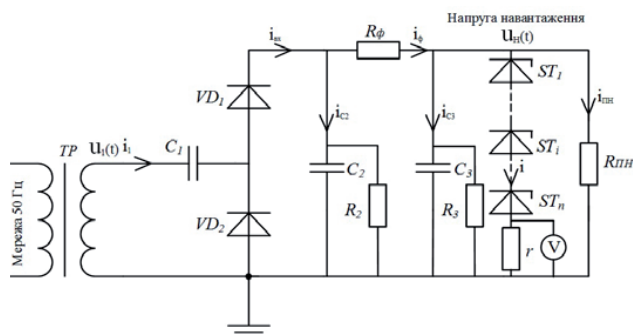


Рис. 1. Функціональна схема живлення установки високої напруги постійного струму

Вольт-амперна характеристика (як приклад, стабілітрона Д818Д) наведена на рис. 2. Її лінеаризований вираз запишемо у вигляді:

$$u_{st}(i) = u_0 + r_d(i - I_0),$$

де r_d — диференціальний опір стабілітрона.

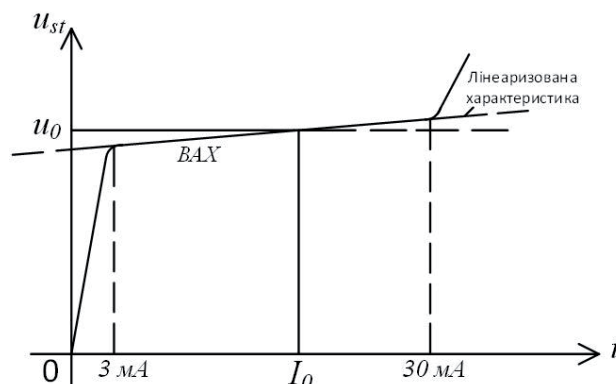


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д

Тоді для напруги навантаження, рис. 1, можна записати:

$$u_H = (U_0 + I_0 \cdot r) + (i - I_0) \cdot (R_d + r),$$

де U_0 — еквівалентна робоча напруга та R_d — еквівалентний диференціальний опір ланки стабілітронів. Звідси:

$$i = \frac{u_H - U_0 - I_0 \cdot r}{R_d + r} + I_0. \quad (1)$$

Тоді струм подільника напруги:

$$i_{ПН} = \frac{u_H}{R_{ПН}}.$$

У складових струму конденсатора C_3 враховуємо емнісну складову та струм, обумовлений активним опором R_3 :

$$i_{C_3} = C_3 \cdot \frac{du_H}{dt} + \frac{u_H}{R_3}. \quad (2)$$

Визначаємо струм $i_\Phi = i_{C_3} + i + i_{ПН}$ та представимо $u_H = U_0 + I_0 \cdot r + \Delta u(t)$, де $\Delta u(t)$ — пульсація напруги навантаження у часі, причому $\int_0^T \Delta u(t) \cdot dt = 0$, де T — період напруги $u_1 = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Тоді запишемо:

$$i_\Phi = \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}} \right) \cdot (U_0 + I_0 \cdot r + \Delta u(t)) + C_3 \cdot \frac{d\Delta u(t)}{dt} + \frac{\Delta u(t)}{R_d + r} + I_0. \quad (3)$$

Знайдемо падіння напруги на R_Φ як $u_\Phi = R_\Phi \cdot i_\Phi$ і далі представимо $u_{C_2} = u_\Phi + u_H$:

$$u_{C_2} = (U_0 + I_0 \cdot r + \Delta u(t)) \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}}\right) + C_3 \cdot R_\Phi \cdot \frac{d\Delta u(t)}{dt} + \Delta u(t) \cdot \frac{R_\Phi}{R_d + r} + I_0 \cdot R_\Phi. \quad (4)$$

Далі знаходимо струм $i_{C_2} = C_2 \cdot \frac{du_{C_2}}{dt} + \frac{u_{C_2}}{R_2}$, звідки маємо:

$$i_{C_2} = (U_0 + I_0 \cdot r + \Delta u(t)) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}}\right) + C_3 \cdot \frac{R_\Phi}{R_2} \cdot \frac{d\Delta u(t)}{dt} + \Delta u(t) \cdot \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot (R_d + r)} + I_0 \cdot \frac{R_\Phi}{R_2} + C_2 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\Phi}{R_d + r}\right) \cdot \frac{d\Delta u(t)}{dt} + C_2 \cdot C_3 \cdot R_\Phi \cdot \frac{d^2\Delta u(t)}{dt^2}. \quad (5)$$

Поєднуючи $i_\Phi + i_{C_2} = i_{вх}$, одержимо вхідний струм $i_{вх}$ в правій частині схеми (рис. 1):

$$i_{вх} = (U_0 + I_0 \cdot r + \Delta u(t)) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}}\right) + \frac{d\Delta u(t)}{dt} \cdot \left(C_3 + C_3 \cdot \frac{R_\Phi}{R_2} + C_2 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\Phi}{R_d + r}\right)\right) + C_2 \cdot C_3 \cdot R_\Phi \cdot \frac{d^2\Delta u(t)}{dt^2} + \frac{\Delta u(t)}{R_d + r} \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right) + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right). \quad (6)$$

В режимі закритого вентиля VD_1 $i_{вх} = 0$, і в правій частині схеми відбувається перерозподіл напруги, який можна описати рівнянням:

$$\frac{d^2\Delta u(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\Delta u(t)}{dt} + a_2 \Delta u(t) = - \frac{(U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}}\right) + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right)}{C_2 C_3 R_\Phi}, \quad (7)$$

де

$$a_1 = \frac{C_3 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right) + C_2 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\Phi}{R_d + r}\right)}{C_2 C_3 R_\Phi},$$

$$a_2 = \frac{\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}} + \frac{1}{R_d + r} \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right)}{C_2 \cdot C_3 \cdot R_\Phi}.$$

Дослідження коренів характеристичного рівняння $p^2 + a_1 \cdot p + a_2 = 0$ показує, що його дискримінант $D > 0$. Отже, рішення для $\Delta u(t)$ знаходимо у вигляді:

$$\Delta u_{ПН}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} + \Delta u_{устале\text{не}ПН}, \quad (8)$$

де $p_1; p_2$ – корені характеристичного рівняння.

Для знаходження констант $A_1; A_2$ використовуємо умову незмінності напруги $u_{C_2}; u_{C_3}$ в момент початку перерозподілу напруги (позначимо момент часу t_2).

В режимі відкритого вентиля VD_1 (в проміжку часу $t_1 \leq t \leq t_2$) маємо:

$$i_{вх} = i_1(t) \quad \text{та} \quad u_{C_2} = U_m \cdot \sin(\omega t) + U_m - \frac{1}{C_1} \cdot \int_{t_1}^t i_1(t) \cdot dt. \quad (9)$$

Звідси знаходимо диференціюванням:

$$\frac{du_{C_2}}{dt} = \omega \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) - \frac{1}{C_1} \cdot i_1(t),$$

а отже:

$$i_1(t) = C_1 \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) - C_1 \cdot \frac{du_{C_2}}{dt}. \quad (10)$$

Із попереднього виразу u_{C_2} знаходимо:

$$\frac{du_{C_2}}{dt} = \frac{d\Delta u(t)}{dt} \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\Phi}{R_d + r}\right) + C_3 \cdot R_\Phi \cdot \frac{d^2\Delta u(t)}{dt^2}$$

та за допомогою цієї підстановки одержуємо рівняння для $\Delta u(t)$ в період зарядження ($t_1 \leq t \leq t_2$) у вигляді:

$$\frac{d^2\Delta u(t)}{dt^2} + b_1 \cdot \frac{d\Delta u(t)}{dt} + b_2 \cdot \Delta u(t) = \frac{C_1 \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos(\omega t)}{R_\Phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)} - \frac{(U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}}\right) + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right)}{R_\Phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)}, \quad (11)$$

де

$$b_1 = \frac{C_3 \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right) + (C_1 + C_2) \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_3} + \frac{R_\Phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\Phi}{R_d + r}\right)}{R_\Phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)},$$

$$b_2 = \frac{\frac{1}{R_2} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\Phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}} + \frac{1}{R_d + r} \cdot \left(1 + \frac{R_\Phi}{R_2}\right)}{R_\Phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)}.$$

Дискримінант характеристичного рівняння в цьому випадку теж більше нуля, і отже, рішення знаходимо у вигляді:

$$\Delta u(t)_{\text{заряджене}} = A_3 \cdot \sin(\omega t + \psi) + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot t} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot t} + \Delta u_{устале\text{не}ЗР}, \quad (12)$$

де A_3 , ψ та $\Delta u_{\text{устале}}^{\text{ЗР}}$ знаходимо через відомі коефіцієнти рівняння; p_3 , p_4 — корені відповідного характеристичного рівняння, а коефіцієнти A_4 та A_5 визначаємо з незмінності u_{C2} ; u_{C3} в момент часу t_1 . Порівнюючи (8), (12) знаходимо:

$$\Delta u_{\text{устале}}^{\text{ПН}} = \Delta u_{\text{устале}}^{\text{ЗР}} = \Delta u_{\text{устале}} = \frac{(U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_{\Phi}}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_{\Phi}}{R_2 \cdot R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} \right) + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_{\Phi}}{R_2} \right)}{\frac{1}{R_2} + \frac{R_{\Phi}}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_{\Phi}}{R_2 \cdot R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_d + r} \cdot \left(1 + \frac{R_{\Phi}}{R_2} \right)}. \quad (13)$$

4.1. 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 ДЕТУ 08-04-99 в режимах номінальних напруг $\bar{U}_{\text{нав}}$ від 1 до 180 кВ [8]. На рис. 1 позначені: C_1 — зарядний конденсатор (0,1 мкФ); C_2 , C_3 — фільтрові конденсатори (0,072 мкФ); R_{Φ} — опір фільтра (1,78 МОм); VD_1 , VD_2 — високовольтні діоди; $ST_1 \dots ST_n$ — стабілітрони типу Д818Д; ПН — омичний подільник напруги.

Стабілітрони Д818Д визначають вибір стабілізованого струму установки $I_0 = 5$ мА для 27 значень вхідних номінальних напруг на навантаженні $\bar{U}_{\text{нав}}$, згідно 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 $\bar{U}_{\text{нав}}$ його струм зменшується пропорційно вхідній напрузі.

Використовуючи незмінність u_{C2} та u_{C3} в моменти t_1 ; t_2 , а також визначення моменту t_1 з умови $U_m(1 + \sin(\omega \cdot t_1)) = u_{C2}(t_1)$, а моменту t_2 — з виразу (10) при $i_1(t) = 0$ та вираз $\int_0^T \Delta u(t) \cdot dt = 0$, одержимо для загального випадку параметрів схеми (рис. 1) рішення для величин U_m , t_1 , t_2 :

$$U_m = \frac{A_3 \cdot R_{\Phi} \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)}{C_1 \cdot \omega} \cdot \sqrt{b_1^2 \cdot \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}, \quad (14)$$

де

$$A_3 = \frac{\omega \cdot \left[-\Delta u_{\text{устале}} \cdot T - \frac{A_1}{p_1} \cdot (e^{p_1 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} \cdot (e^{p_2 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \frac{A_4}{p_3} \cdot (e^{p_3 \cdot \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} \cdot (e^{p_4 \cdot \Delta t} - 1) \right]}{\cos \psi - \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi)},$$

$$t_1 = \frac{\arcsin\left(\frac{1}{U_m} \cdot X_1 - 1\right)}{\omega}, \quad (15)$$

де

$$X_1 = I_0 \cdot R_{\Phi} + (U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{R_{\Phi}}{R_3} + \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{ПН}}} \right) + (\Delta u_{\text{устале}} + A_3 \cdot \sin \psi + A_4 + A_5) \cdot \left(1 + \frac{R_{\Phi}}{R_3} + \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{ПН}}} + \frac{R_{\Phi}}{R_d + r} \right) + C_3 \cdot R_{\Phi} \cdot (\omega \cdot t_1 \cdot \cos \psi + p_3 \cdot A_4 + p_4 \cdot A_5) \cdot \arccos\left(\frac{X_2}{U_m \cdot \omega}\right), \quad (16)$$

де

$$X_2 = C_3 \cdot R_{\Phi} \cdot (-\omega^2 \cdot t_1 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3^2 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4^2 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t}) + \left(1 + \frac{R_{\Phi}}{R_3} + \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{ПН}}} + \frac{R_{\Phi}}{R_d + r} \right) \times (\omega \cdot A_3 \cdot \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t}),$$

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

У підсумку одержана система рівнянь з сімома невідомими: A_1 ; A_2 ; A_4 ; A_5 ; U_m ; t_1 ; t_2 . Проведений аналіз показує, що ця система має 1 рішення в множині дійсних чисел.

Були проведені розрахунки за рішенням системи рівнянь для параметрів $r = 10$ кОм для режимів $\bar{U}_{\text{нав}} = 1 \dots 10$ кВ та $r = 60$ кОм для режимів $\bar{U}_{\text{нав}} = 20 \dots 180$ кВ. Значення r_d визначалось згідно [9] рівним 22 Ом для кожного стабілітрона, а $R_d = n \cdot r_d$, n — кількість стабілітронів, відповідна кожному режиму $\bar{U}_{\text{нав}}$, що визначена виходячи із середнього значення напруги стабілізації Д818Д $u_0 = 9$ В. За результатами розрахунків визначались максимальні позитивні значення пульсації $\Delta u(t) = \Delta_1$ та мінімальні від'ємні значення пульсації $\Delta u(t) = \Delta_2$, а також коефіцієнт амплітуди пульсації:

$$\Delta_{\text{П}} = \frac{0,5 \cdot (\Delta_1 - \Delta_2)}{\bar{U}_{\text{нав}}} \cdot 100 \%. \quad (17)$$

Отримані результати розрахунків для граничного випадку $R_2 \rightarrow \infty$, $R_3 \rightarrow \infty$ наведені в табл. 1.

За одержаними результатами розрахунків на рис. 3, 4 побудова залежності коефіцієнта амплітуди пульсації $\Delta_{\text{П}}$ та напруги U_m джерела живлення установки від напруги навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$. В табл. 1 також наведено значення сумарного струму навантаження $I_{\text{н}} = I_0 + I_{\text{ПН}}$ (мА) для кожного режиму установки.

Таблиця 1

Розраховані значення напруги U_m , амплітуди пульсацій Δ_1 , Δ_2 та коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_{Π} для 27 режимів живлення установки

$\bar{U}_{\text{нав}}$, В	U_m , В	Δ_1 , В	Δ_2 , В	Δ_{Π} , %	I_n , мА
1000	5971,38	3,54	-4,08	0,381	5,0833
2000	6609,66	3,81	-4,88	0,217	5,16667
3000	7248,03	4,45	-5,69	0,169	5,25
4000	7886,47	5,04	-6,49	0,144	5,3333
5000	8524,96	5,57	-7,27	0,128	5,41667
6000	9163,51	6,04	-8,04	0,117	5,5
7000	9802,11	6,44	-8,81	0,109	5,5833
8000	10440,75	6,78	-9,54	0,102	5,66667
9000	11079,43	7,07	-10,26	0,096	5,75
10000	11718,14	7,31	-10,97	0,091	5,8333
20000	18266,51	11,41	-20,65	0,08	6,66667
30000	24656,73	13,09	-24,15	0,062	7,5
40000	29271,22	11,71	-22,07	0,042	6,66667
50000	35222,53	12,46	-23,82	0,036	7,0833
60000	41174,21	13,18	-25,51	0,032	7,5
70000	46094,53	12,18	-23,86	0,025	6,9444
80000	51900,12	12,63	-24,97	0,023	7,2222
90000	57705,85	13,09	-26,05	0,021	7,5
100000	62041,26	11,11	-22,32	0,017	6,38889
110000	67700,81	11,39	-22,88	0,016	6,52778
120000	73360,42	11,67	-23,43	0,015	6,66667
130000	79020,08	11,95	-23,97	0,014	6,80556
140000	84679,79	12,22	-24,51	0,013	6,9444
150000	90339,54	12,49	-25,03	0,012	7,0833
160000	95999,33	12,76	-25,55	0,0119	7,2222
170000	101659,13	13,02	-26,07	0,0115	7,36111
180000	107318,96	13,29	-26,59	0,0111	7,5

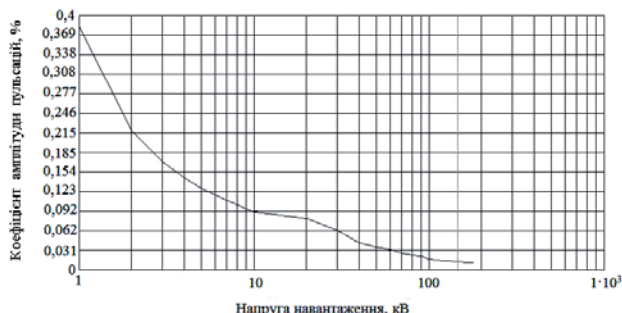


Рис. 3. Залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій від напруги навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$ в діапазоні 1...180 кВ

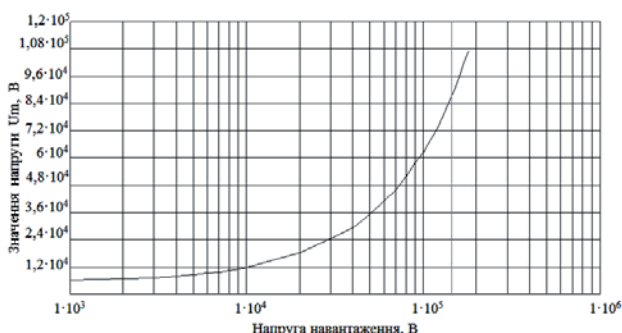


Рис. 4. Залежність напруги U_m джерела живлення від напруги навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$ в діапазоні 1...180 кВ

Залежність, наведена на рис. 3 показує, що зі збільшенням напруги навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$ коефіцієнт амплітуди пульсацій Δ_{Π} відповідно зменшується. В режимі $\bar{U}_{\text{нав}} = 1$ кВ коефіцієнт амплітуди пульсацій $\Delta_{\Pi} = 0,381\%$, а режимі $\bar{U}_{\text{нав}} = 180$ кВ коефіцієнт амплітуди пульсацій становить $\Delta_{\Pi} = 0,0111\%$. Визначені значення пульсацій в різних режимах роботи установки відрізняються фактично в 35 разів.

Залежність, наведена на рис. 4 показує, що зі збільшенням напруги навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$ значення напруги U_m збільшується за певною нелінійною залежністю. Запропонована математична модель адекватно відображає процеси, які відбуваються в схемі живлення установки високої напруги постійного струму.

Залежність, наведена на рис. 5 показує, що із збільшенням відношення додаткового навантаження схеми струмами I_2 ; I_3 до значення струму I_n значення коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_{Π} збільшується.

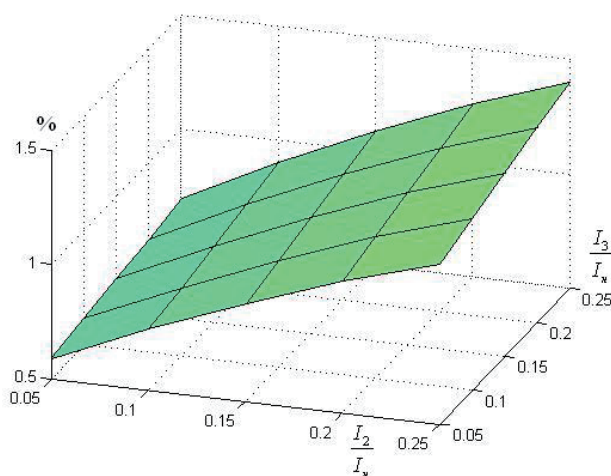


Рис. 5. Залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_{Π} від додаткового навантаження схеми струмами I_2 , I_3 , які показані по відношенню до значення струму I_n в режимі $\bar{U}_{\text{нав}} = 1$ кВ

Мінімальне та максимальне значення коефіцієнта амплітуди пульсацій, за даними рис. 5, Δ_{Π} дорівнюють 0,589 % і 1,401 % відповідно, що показує суттєвий вплив додаткового навантаження схеми на амплітуду пульсацій.

5. Обговорення результатів дослідження залежності амплітуди та форми пульсацій напруги від режиму високовольтної установки постійного струму та її навантаження

Запропонований метод дослідження високовольтних установок постійного струму дозволяє здійснювати аналітичні, високоточні розрахунки параметрів каскадних генераторів напруги, що виконано в перше. Сьогодні науковці пропонують адекватні математичні моделі [10] для розрахунку подібного типу приладів, але вони не враховують нелінійність параметрів установки. Запропонований аналітичний метод дає змогу визначати точне значення коефіцієнта пульсацій напруги високовольтних установок і, що особливо важливо, їх форму.

З проведених розрахунків та рис. 3, 5 видно залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_{Π} від напруги

навантаження $\bar{U}_{\text{нав}}$ та від відношення додаткового навантаження схеми струмами I_2 ; I_3 до значення струму I_n . Рис. 5 показує, що змінюючи значення активних елементів схеми живлення установки високої напруги постійного струму можна регулювати коефіцієнт амплітуди пульсацій її вихідної напруги.

Проведення подальших досліджень параметрів установок високої напруги постійного струму з нелінійним навантаженням є актуальним та дозволить визначати їх характеристики, що впливають на якість технологічних процесів, побудованих з використанням таких установок.

6. Висновки

1. Для загального випадку нелінійного навантаження високовольтного каскадного джерела постійного струму знайдено аналітичне рішення для його напруги та її нелінійної пульсації в кінцевих виразах, що виконано вперше.

2. Застосувавши запропонований аналітичний метод, розраховано параметри схеми живлення зразка установки високої напруги постійного струму. Можна зазначити, що в режимі робочої напруги 1 кВ амплітуда пульсації напруги фактично складає 0,38 % (за проведеними розрахунками — 0,3814 %), а в режимі 180 кВ — 0,0111 %. Коефіцієнт пульсацій Δp суттєво залежить від режиму установки високої напруги постійного струму та її навантаження.

3. Одержані результати показують, що запропонований аналітичний метод дозволяє здійснювати точні розрахунки режимів напруги високовольтних каскадних генераторів з нелінійним навантаженням, що визначають їх якісні характеристики як джерел живлення високовольтних технологічних установок.

Література

- Бржезицький, В. О. Техніка і електрофізика високих напруг [Текст]: 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.
- Greinacher, H. Erzeugung einer Gleichspannung vom vielfachen Betrage einer Wechselspannung ohne Transformator [Text] / H. Greinacher // Bull. schweiz. elektrotechn. Vereins. — 1920. — № 7. — С. 59–63.
- Cockcroft, J. D. Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions [Text] / J. D. Cockcroft, E. T. S. Walton // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1932. — Vol. 136, № 830. — С. 619–630. doi:10.1098/rspa.1932.0107
- Neilpern, W. Kaskadengeneratoren zur Partikelbeschleunigung auf 4 MeV [Text] / W. Neilpern // Helv. phys. acta. — 1955. — Bd 28, № 5–6. — С. 485–491.
- Кастров, М. Ю. Полупроводниковые широкодиапазонные стабилизаторы напряжения переменного тока [Текст] / М. Ю. Кастров // Научно-технический журнал «Электросвязь». — 2005. — № 10. — С. 20–22.
- Альбертинский, Б. С. Каскадные генераторы [Текст] / Б. С. Альбертинский, М. П. Свинын. — М.: Атомиздат, 1980. — С. 210.
- Бржезицький, В. О. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму [Текст] / В. О. Бржезицький, Р. В. Вендичанський, О. М. Десятов, Я. О. Гаран // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 1. — С. 7–13.
- Зайцева, С. А. Метрологія, стандартизація і сертифікація в енергетиці [Текст] / С. А. Зайцева, А. Н. Толстой і др. — М.: ІІЦ «Академія», 2009. — С. 16–75.

- Голомедов, А. В. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры [Текст]: справочник / А. В. Гитцевич, А. А. Зайцев, В. В. Мокряков и др.; под ред. А. В. Голомедова. — М.: Радио и связь, 1988. — С. 347–350.
- Северин, В. П. Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги [Текст] / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, М. І. Ахтирцев // Вісник НТУ «ХПІ». — 2013. — № 33. — С. 19–24.

АНАЛІЗ ПУЛЬСАЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕННЯ ПОСТІЙНОГО ТОКА

В статье решен вопрос расчета режимов напряжения высоковольтного каскадного генератора с нелинейной нагрузкой с помощью аналитического метода. Для каскадного высоковольтного источника постоянного тока найдено аналитическое решение для его напряжения и нелинейной пульсации. Проведено исследование зависимости амплитуды пульсаций от параметров схемы генератора.

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

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Десятов Олег Михайлович, аспірант, асистент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», e-mail: oleg_desyatov@ukr.net.

Сулейманов Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, професор кафедри електричних мереж та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Хомініч Віктор Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Бржезицький Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Десятов Олег Михайлович, аспирант, ассистент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Сулейманов Виктор Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электрических сетей и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Хоминич Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Brzhezitskyi Vladimir, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Desiatov Oleh, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: oleg_desyatov@ukr.net.

Suleimanov Victor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Khominich Victor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine