

## ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯ У ВИХІДНИХ КОЛАХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПОТУЖНИХ ГАЗОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК

**В.В. Мартинов\***, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [mart\\_v@ied.org.ua](mailto:mart_v@ied.org.ua)

*Енергоємність вихідного кола імпульсного джерела високої напруги для газорозрядного навантаження визначається сукупністю енергій, що накопичуються в його реактивних елементах у робочих або перехідних режимах. Через пробой у вихідному колі високовольтних джерел електроживлення накопичена енергія може неконтрольовано вивільнятися і призводити до відмов елементів або до появи технологічних дефектів. Встановлено взаємозв'язок між величиною пульсацій вихідної напруги, опором навантаження, параметрами індуктивно-ємнісного вихідного фільтра, потужності джерела живлення та частоти його перетворення. Отримано аналітичні вирази, що дають змогу розраховувати параметри вихідного фільтра потужного високовольтного джерела електроживлення, виходячи з допустимої енергії, яка може накопичуватися у вихідному фільтрі при забезпеченні допустимих пульсацій напруги на виході перетворювача. Встановлено, що чим меншим є коефіцієнт затухання перехідних процесів, тим більшу енергію треба накопичувати у фільтруючих елементах для забезпечення необхідної якості вихідної енергії. На розрахунковому прикладі джерела живлення напругою 30 кВ, потужністю 450 кВт, частотою перетворення 20 кГц та вихідними пульсаціями менше 1 % показано, що задля реалізації без коливальних перехідних процесів за значних змін струму навантаження енергоємність вихідного фільтра може перевищувати величину 1 Дж/кВт. У разі збільшенні еквівалентної частоти перетворення ця величина може бути суттєво зменшена. Бібл. 13, рис. 4.*

**Ключові слова:** високовольтне джерело електроживлення, газорозрядне навантаження, напівпровідниковий перетворювач, енергоємність вихідного згладжуючого фільтра.

**Вступ.** Режимми електротехнологічних процесів залежать як від конструктивних особливостей технологічних систем, так і від показників електричних параметрів електроживлення та їхньої стабільності, особливо в потужних системах електронно-променевого та плазмового технологічного обладнання. Відмінною особливістю розглянутих вище електротехнологій є те, що між оброблюваним виробом і джерелом електроенергії, перетворювачем, звичайно присутнє деяке газове середовище, характеристики якого багато в чому визначають характеристики навантаження перетворювача електроенергії. Під час технологічного процесу характеристики газового середовища, яке бере участь в технологічному процесі, безперервно змінюються. Ці зміни відбуваються під впливом зростання температури, зміни тиску в технологічній камері і ін., що провокує перехід одного виду розряду в інший. В цьому випадку у разі виникнення дугового розряду у технологічних процесах, що розглядаються, задля запобігання утворення дефектів необхідне швидке відключення навантаження від живлячої мережі. А потім швидке відновлення прискорювальної напруги з метою продовження технологічного режиму без перерегулювання, яке може викликати повторний перехід одного виду газового розряду в інший.

Потужність сучасних електронно-променевих гармат перевищує сотні кіловат за напруги в декілька десятків кіловольт. Ці вимоги вступають в протиріччя з показниками якості електроенергії, зокрема за рівнем пульсацій напруги, який традиційно забезпечується застосуванням в колах електроживлення енергоємних електричних фільтрів, що складаються з індуктивностей і ємностей [1].

В останні роки досить широко застосовуються джерела живлення на основі високочастотних транзисторних перетворювачів. Завдяки малій накопиченій енергії – до 1...2 Дж/кВт [2] – суттєво ускладнений перехід іскрових розрядів у прискорювальному проміжку у дугу, що запобігає спрацьовуванню струмового захисту джерела живлення. Застосування джерел електроживлення з високо-частотною імпульсною модуляцією дає змогу суттєво зменшити енергоємність фільтрів задля досягнення необхідних параметрів якості електроенергії з одночасним зменшенням ймовірності дугоутворення у технологічному навантаженні.

---

© Мартинов В.В., 2023

\*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2184-0394>

При цьому, для побудови потужних джерел електроживлення найбільшого поширення набула стратегія, заснована на паралельному з'єднанні перетворювачів (модулів) меншої потужності [3], що працюють на загальне навантаження. Це дозволяє не тільки рівномірно розподіляти навантаження між окремими модулями і, тим самим, знизити щільність виділення енергії в одиниці об'єму, спростити конструкції перетворювачів, а й модульне виконання силової частини спільно з багатофазним керуванням, що сприяє зменшенню габаритів та параметрів вихідних фільтрів, підвищенню швидкодії імпульсного джерела електроживлення [4].

Ступінь впливу вихідних параметрів джерела електроживлення на якість технологічних процесів різна. Більшою мірою впливають стабільність і пульсації постійної напруги джерела прискорюючої напруги. Наявність пульсацій і відхилення напруги, наприклад, в зварювальних установках призводять до розфокусування електронного променя і, як наслідок, до зміни щільності теплового потоку [2]. Для установок електронно-променевого напилення нестабільність прискорюючої напруги [5] призводить до коливання товщини слою напилення. У разі виникнення коротких замикань у навантаженні в подібних установках використовують переривання струму навантаження. Для деяких технологій бездефектна пауза в навантажувальному струмі не повинна перевищувати 50 мікросекунд, а це накладає суттєві обмеження на параметри перехідних процесів, особливо в потужних джерелах електроживлення.

З позиції силової електроніки задачі електроживлення технологічних установок украй складні. Справа не тільки у великій потужності устаткування, високій напрузі і підвищених вимогах до якості електроенергії. В цих задачах іноді виникають фізичні суперечності. Наприклад, електронно-променеві зварювальні установки чутливі до рівня пульсацій анодної напруги [6, 7]. Подавити пульсації можна за рахунок застосування фільтрів, що містять реактивні елементи, але підвищення запасу енергії у вихідному ланцюзі джерела приводить до руйнування електродів електронної гармати при періодичних пробоях і є неприпустимим.

**Метою роботи** є визначення взаємозв'язку основних параметрів потужних джерел електроживлення для газорозрядних установок з якістю вихідної напруги та накопиченою енергією в їхніх вихідних колах.

Традиційні імпульсні перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією для отримання прийнятної рівня пульсацій у вихідній напрузі вимагають встановлення фільтрів, наприклад, індуктивно-емнісних. Проте, наявність фільтрів може привести до неможливості джерела живлення виконати одну з своїх основних функцій, наприклад, в електронно-променевих установках – здатність джерела електроживлення переривати короткі замикання у навантаженні із забезпеченням необхідних перехідних процесів. Підвищення потужності електротехнологічного навантаження вимагає знаходження структур та параметрів елементів електричних кіл імпульсних перетворювачів за яких електричний процес підпорядковуватиметься заданим законам [8, 9].

Традиційну структуру високовольтного джерела електроживлення для потужних газорозрядних технологічних навантажень, наприклад, електронно-променевих гармат, наведено на рис. 1.

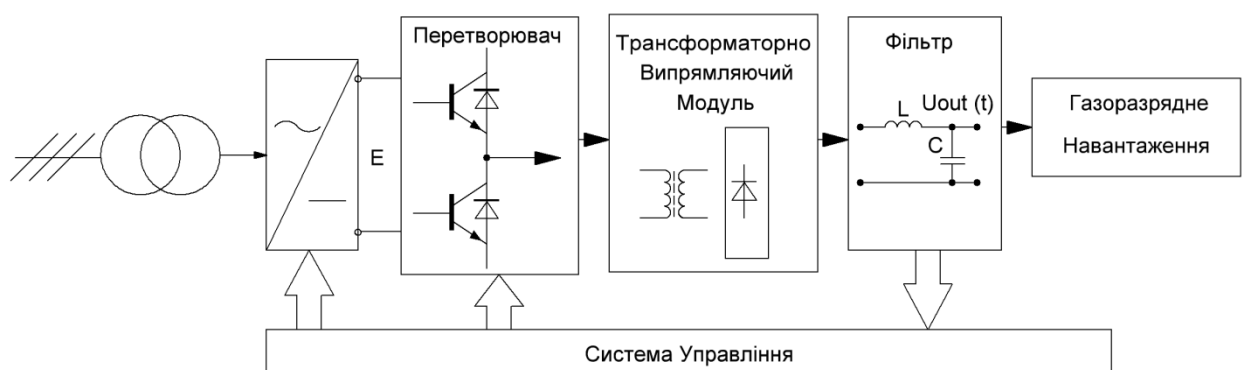


Рис. 1

Вона складається з вхідного мережевого трансформатора; силового випрямляча; перетворювача з високочастотною імпульсною модуляцією; високочастотного високовольтного трансформаторно-випрямляючого модуля; вихідного фільтра та системи управління. Причому зображений вихідний фільтр, позначений ланкою другого порядку, включає всі обчислювані накопичувальні ланки елект-

роенергії від перетворювача до газорозрядного навантаження, оскільки енергоємність вихідного кола джерела високої напруги визначається сукупністю енергій [10], що накопичуються в її реактивних елементах у робочих та перехідних режимах. Практично всі враховані накопичувачі, залежно від структури перетворювальної частини, істотно впливають на якість вихідної електроенергії, якість перехідних процесів, їхню тривалість, коливальність та перерегулювання, а також визначають кількість енергії, яка може неконтрольовано вивільнитися у навантаженні та призводити до відмов елементів або до появи технологічних дефектів.

Вважаємо, що наведена на рис. 1 еквівалентна схема фільтра визначає всі інерційні властивості джерел електроживлення технологічних навантажень, що розглядаються. Задля забезпечення необхідного перехідного процесу та відповідного технологічного режиму допустимого запасу електроенергії [2, 5, 7] необхідно визначити параметри елементів фільтра в залежності від властивостей і потужності перетворювача.

Будь-який встановлений та перехідний режим характеризується певними запасами енергії магнітного та електричного полів у кожний момент часу, наприклад, у вихідних елементах фільтра кола навантаження. Розглянемо можливість досягнення необхідних часових параметрів при перехідних процесах, які виникають в електричних колах при впливах, що призводять до переходу від одного стаціонарного стану до іншого, наприклад, під час підключенні розрядженого конденсатора  $C$  до джерела напруги  $U$  через резистор  $R$ . У цьому випадку напруга на конденсаторі  $U_C$  описується відомим виразом (1)

$$U_C = U \left( 1 - e^{-t/RC} \right), \quad (1)$$

де  $RC = \tau$  – стала часу кола.

З (1) визначимо час перехідного процесу. Для цього в правій частині виразу (1) експоненційний член розкладемо в ряд Тейлора, відкинемо всі члени старше першого та отримаємо

$$t = \frac{U_C}{U} R. \quad (2)$$

Напругу на конденсаторі  $U_C$  (2) позначимо через напругу джерела живлення  $U_C = kU$  (де  $k=0 \div 1$ ) і тоді

$$t = \frac{2 \cdot k \cdot Q}{P}, \quad (3)$$

де  $P = UI$  – потужність джерела живлення;  $Q = C \cdot U^2 / 2$  – енергія, яка накопичена в вихідному конденсаторі.

З (3) видно, що для мінімізації часу перехідного процесу необхідно або збільшити встановлену потужність джерела електроживлення, або зменшити накопичувану енергію в колі, в якому відбувається перехідний процес, або зменшити діапазон зміни енергії в цьому колі. Збільшувати встановлену потужність системи електроживлення найпростіший, але неефективний шлях. Тому основна увага при розробці потужних імпульсних джерел електроживлення для газорозрядного навантаження приділяється мінімізації накопиченої енергії у вихідних колах за рахунок оптимального вибору структур перетворювачів та розрахунку вихідних фільтрів. Розрахунок параметрів  $LC$ -фільтра присвячено багато літератури [10, 11, 12]. Розрахунок пульсацій при ШІМ ведеться по різному. Якісний аналіз кривих вихідної напруги показує, що відношення частоти перемикання перетворювача до власної частоти зрізу фільтра є фундаментальними параметрами, які визначають запас енергії в вихідних колах перетворювача. Ключове значення цього відношення полягає в тому, що воно є сполучною ланкою між якістю вихідної напруги, параметрами фільтра і частотою перемикання.

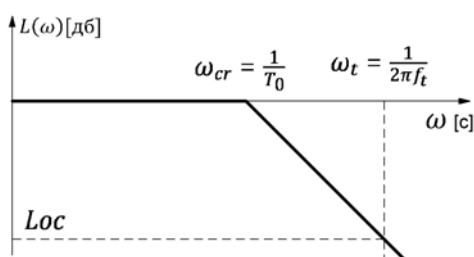


Рис. 2

На рис. 2 наведено ідеалізовану амплітудно-частотну характеристику фільтра нижніх частот другого порядку. Наведемо спрощену методику вибору параметрів фільтра, яка дозволить в кінцевому рахунку визначити схемотехніку інверторів задля досягнення необхідної якості

вихідної напруги та мінімізації енергії у вихідних колах. Введемо поняття коефіцієнт придушення, який дорівнює відношенню вихідної напруги ( $U_n$ ) до змінної складової від піка до піка ( $U_d$ ) в вихідній напрузі:  $K_{pd} = U_n / U_d$ .

Тоді коефіцієнт ослаблення змінної складової, в децибелах:  $Loc = 20 * \lg K_{pd}$ .

Знаючи необхідний коефіцієнт ослаблення змінної складової та частоту перетворення, можна визначити частоту зрізу фільтра другого порядку наступним чином:  $f_{cr} = f_t / 10^{0.025 \cdot Loc}$ , яка пов'язана з постійною часу фільтра. Тому для фільтра другого порядку маємо

$$\sqrt{LC} = \frac{10^{0.025 \cdot Loc}}{2 \cdot \pi \cdot f_t}, \quad (4)$$

Відомий вираз для коефіцієнта загасання фільтра другого порядку [14] пов'язує параметри навантаження, ємності й індуктивності

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot R_n} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5)$$

Використовуючи вирази (4, 5) визначимо енергетичні характеристики фільтра другого порядку, або який запас енергії повинен бути в фільтрі, щоб знизити амплітуду вихідних пульсацій до необхідного рівня. Перепишемо рівняння (5) у наступному вигляді:

$$C = \frac{\sqrt{LC}}{2R\xi} = \frac{\sqrt{LC}}{2 \cdot \frac{U_n \cdot \xi}{I_n}}. \quad (6)$$

Звівши в квадрат ліву і праву частину виразу (6) і зробивши необхідні перетворення, отримаємо

$$\frac{CU_n^2}{2} = \frac{LI_n^2}{2} \frac{1}{4 \cdot \xi^2}. \quad (7)$$

З аналізу (7) випливає що енергія накопичена в ємності фільтра, істотно залежить від коефіцієнта загасання. За коефіцієнта загасання рівним одиниці забезпечується не коливальний перехідний процес, якщо енергія, збережена в ємності фільтра, в чотири рази менше енергії дроселя. З (6) з урахуванням (4) отримуємо

$$\frac{C \cdot U_n^2}{2} = \frac{I_n \cdot U_n}{8 \cdot \pi \cdot f_T} \frac{10^{0.5 \left( \left( \ln \frac{U_n}{U_d} \right) / (\ln 2 + \ln 5) \right)}}{\xi}. \quad (8)$$

На рис. 3 представлені результати розрахунку необхідного запасу енергії  $Q$  в конденсаторі фі-

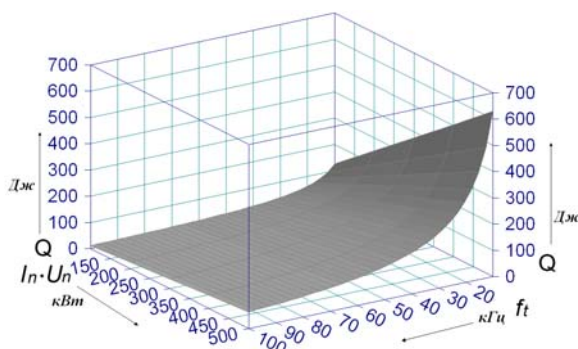


Рис. 3

льтра за виразом (8) для досягнення розрахункових пульсацій 1% за коефіцієнта загасання рівним 0,1, залежно від потужності навантаження ( $I_n \cdot U_n$ ) і частоти перемикачів ( $f_t$ ) на вході фільтра. Як впливає з рис. 3 за частоті перетворення 20 кГц і потужності джерела близько 500 кВт параметри вихідного фільтра для забезпечення необхідних пульсацій повинні бути такі, що у вихідному фільтрі повинно накопичуватися енергії більше 600 Дж. А це суттєво перевищує вимоги, що пред'являються до цих джерел елект-

рживлення щодо забезпечення бездефектної технологічної процедури.

Характерною особливістю джерел електроживлення для газорозрядного навантаження є те, що необхідну якість електроенергії треба забезпечувати у всьому діапазоні зміни струму навантаження – від холостого ходу до номінального струму. На холостому ходу показники якості електроенергії забезпечуються енергією, що накопичується

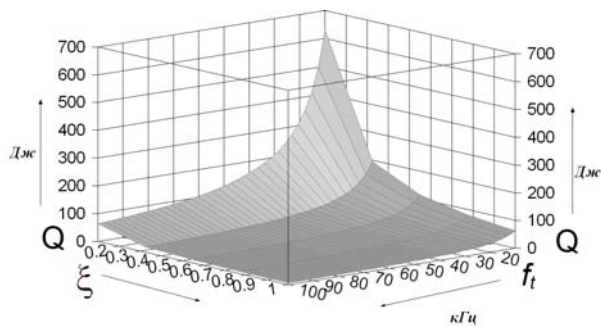


Рис. 4

в електричному полі (ємнісної складової фільтра), а під навантаженням додається енергія від індуктивної складової фільтра. Це суттєво змінює підходи до проектування джерел електроживлення та їхніх вихідних фільтрів.

На рис. 4 представлено результати розрахунку необхідного запасу енергії  $Q$  в конденсаторі фільтра за виразом (8) за розрахункових пульсаціях 1% та постійної потужності у навантаженні 500 кВт. З графіків видно, що для забезпечення коефіцієнта загасання більше одиниці, для запобігання перерегулюванню та забезпечення без коливального перехідного процесу в широкому діапазоні зміни струму навантаження та мінімізації запасу енергії у вихідних колах необхідно істотно збільшувати частоту перетворення, що для потужних систем електроживлення може бути важко.

Але навіть за коефіцієнта затушення, що дорівнює одиниці (рис. 4), і не дуже жорстким вимогам до коефіцієнту придушення (1%), як впливає з (8), за потужності навантаження 450 кВт і напрузі 30 кВ в фільтрі буде накопичуватися близько 45 джоулів енергії. Це істотно знижує динамічні характеристики високовольтних джерел електроживлення, наприклад, для електронно-променевої гармати.

Домогтися істотного зменшення накопиченої енергії у вихідних колах можна не тільки підвищуючи частоту перетворення потужного джерела електроживлення, але й використовуючи ефект, створюваний багатофазними перетворювачами [13]. За відносно невисокої частоті комутації в окремому каналі багатофазні перетворювачі забезпечують оптимальні процеси перетворення електроенергії та суттєво підвищують еквівалентну частоту пульсацій на виході джерела живлення, дозволяючи в багатьох випадках розробляти системи електроживлення взагалі без вихідних фільтрів. Такий підхід дає змогу створювати перетворювачі, які без застосування енергоємних фільтрів реалізують як вихідну напругу з малим рівнем пульсацій, так і без коливальні зміни струму в умовах стрибкоподібної зміни опору навантаження.

Отримані вирази (4)–(8) дають змогу визначати основні параметри як імпульсного перетворювача, так і модулів, які об'єднуються у багатофазну систему, з вихідним фільтром другого порядку, виходячи з допустимої енергії на виході джерела живлення.

**Висновки.** Отримано аналітичні залежності, що зв'язують потужність джерела електроживлення, частоти перетворення, параметри елементів їхніх еквівалентних схем та енергії в їхніх вихідних колах. Показано, що у високовольтних системах електроживлення енергетичні характеристики їхніх індуктивно-ємнісних фільтрів впливають на якість вихідної напруги. При цьому енергія цих фільтрів істотно залежить від потужності джерела, частоти перетворення і параметрів затушення їхньої еквівалентної схеми. Встановлено, що чим меншим є коефіцієнт затушення перехідних процесів в еквівалентній схемі фільтра, тим для забезпечення необхідної якості вихідної напруги треба накопичувати більшу енергію у фільтруючих елементах. При підвищенні потужності систем електроживлення для збереження необхідної якості вихідної напруги слід підвищувати еквівалентну частоту перетворення, віддаючи перевагу багатофазним перетворювачам, або збільшувати величину накопиченої енергії в вихідних колах в межах допустимих величин за умовами застосування.

*Роботу виконано за держбюджетною темою "Джерело-3", державний реєстраційний номер 0119U001289 (КПКВК 6541030).*

1. Vasyukov I. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Zhivodernikov A. V., Batyukov A. V. and Shcherbakov A. V.. High voltage switch-mode power supply for electron-beam technology with minimum load breakdown energy. IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 1109. 2018. 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012027>.

2. Назаренко О.К., Локшин В.Е. Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки. *Автоматическая Сварка*. 2005. № 1. С. 36-38.
3. Комаров Н.С., Мартынов В.В. Развитие теории транзисторных преобразователей с высокочастотной импульсной модуляцией. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1. Ч. 2. С. 73-75.
4. Мартинов В.В., Монжеран Ю.П., Можаровский А.Г., Лебедев Б.Б., Смитюх Г.Е., Чайка Н.В., Иванов А.М. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева. *Современная электротехнология*. 2010. № 2. С. 57-60.
5. В. М. Спивак, Т. А. Терещенко, В. Д. Шелягин, Г. М. Младенов. Системы управления лучевых технологических установок. К.: Техника, 1988. 272 с.
6. Назаренко О.К., Ланбин В.С. Исследование высоковольтных цепей управления током сварочного электронного пучка. *Автоматическая сварка*. 2007. № 5 (649). С. 26-30.
7. Лубинец Г.Я., Мельник В.И., Тугай Б.А. Исследование дуговых пробоев в газоразрядных электронных пушках и его зависимости от параметров внешней цепи. Сб. тез. докл. IV Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1982. С. 119-122.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 3-11.
9. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 24 – 29.
10. Мартынов В.В., Лебедев Б.Б. Энергия выходной цепи источника ускоряющего напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 4. С. 50-55.
11. Голубев В.В. Расчет и оптимизация выходного LC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 33-37.
12. Novskiy V., Martynov V., Martynov D. Selection of the basic parameters of the grid-tied inverter with PWM in the mode of tracking the reference signal. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. С. 323-327. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250102>
13. Щерба А.А., Мартинов В.В. Высоковольтні багатofазні напівпровідникові перетворювачі зі зменшеним накопиченням енергії для газорозрядних установок. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.065>

## DETERMINATION OF CONDITIONS FOR REDUCING ENERGY ACCUMULATION IN THE OUTPUT CIRCUITS OF POWER SOURCES OF POWERFUL GAS-DISCHARGE INSTALLATIONS

V.V. Martynov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [mart\\_v@ied.org.ua](mailto:mart_v@ied.org.ua)

*The energy intensity of the output circuit of a high-voltage pulse source for a gas-discharge load is determined by the totality of energies accumulated in its reactive elements in operating or transient modes. During breakdowns in the output circuit of high-voltage power supplies, the accumulated energy can be released uncontrollably and lead to element failures or technological defects. The relationship between the magnitude of the output voltage ripple, the load resistance, the parameters of the inductive-capacitive output filter, the power of the power source and the frequency of its conversion has been established. Analytical expressions are obtained that make it possible to calculate the parameters of the output filter of a high-voltage powerful power supply based on the allowable energy that can accumulate in the output filter while providing allowable voltage ripples at the output of the converter. It has been established that the lower the attenuation coefficient of transient processes, the more energy must be accumulated in the filter elements to ensure the required quality of the output energy. On a calculated example of a power supply with a voltage of 30 kV, a power of 450 kW, a conversion frequency of 20 kHz and output ripples of less than 1%, it is shown that for implementation without oscillatory transients with significant changes in load current, the energy intensity of the output filter can exceed 1 J/kW. With an increase in the equivalent conversion frequency, this indicator can be significantly reduced. References 13, figures 4.*

**Keywords:** high-voltage power supply, gas-discharge load, semiconductor converter, energy consumption of the output smoothing filter.

1. Vasyukov I. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Zhivodernikov A. V., Batyukov A. V. and Shcherbakov A. V.. High voltage switch-mode power supply for electron-beam technology with minimum load breakdown energy.

IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109. 2018. 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012027>.

2. Nazarenko O.K., Lokshin V.E. Dynamic characteristics of high-voltage power sources for electron-beam welding. *Automatic Welding*. 2005. No 1. Pp. 36-38. (Rus)
3. Komarov N.S., Martynov V.V. Development of the theory of transistor converters with high-frequency pulse modulation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2007. No 1. Ch. 2. Pp. 73-75. (Rus)
4. Martynov V.V., Monzheran Yu.P., Mozharovsky A.G., Lebedev B.B., Smityukh G.E., Chaika N.V., Ivanov A.M. High voltage power supply for electron beam heating. *Modern electrometallurgy*. 2010. No 2. Pp. 57-60. (Rus)
5. Spivak V. M., Tereshchenko T. A., Shelyagin V. D., Mladenov G. M. Control systems of beam technological installations. K.: Tekhnika, 1988. 272 p. (Rus)
6. Nazarenko O.K., Lanbin V.S. Investigation of high-voltage control circuits of the current of the welding electron beam. *Automatic welding*. 2007. No 5 (649). Pp. 26-30. (Rus)
7. Lubinets G.Ya., Melnik V.I., Tugai B.A. Investigation of arc breakdowns in gas-discharge electron guns and its dependence on the parameters of the external circuit. Sat. abstract report IV All-Union Symposium on high-current electronics. Tomsk, 1982. Pp. 119-122. (Rus)
8. Shcherba AA, Suprunovskaya N.I. Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storage in semiconductor generators of powerful discharge pulses. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 1. Pp. 3-11. (Rus)
9. Yagup V.G., Yagup E.V. Synthesis of an electrical system in the time domain by search engine optimization. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 2. Pp. 24-29. (Rus)
10. Martynov V.V., Lebedev B.B. Energy of the output circuit of the accelerating voltage source. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 4. Pp. 50-55. (Rus)
11. Golubev V.V. Calculation and optimization of the output LC filter of a switching AC voltage converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 33-37. (Rus)
12. Novskiy V., Martynov V., Martynov D. Selection of the basic parameters of the grid-tied inverter with PWM in the mode of tracking the reference signal. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. Pp. 323-327. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250102>
13. Shcherba AA, Martynov V.V. High-voltage multiphase semiconductor converters with reduced energy storage for gas discharge installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. No 4. 2018. Pp. 65-69. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.065>

Надійшла 17.04.2022  
Остаточний варіант 10.11.2022