

С.М. Верещаго, В.І. Костюченко, С.М. Новогорецький

## Аналіз перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу

В роботі проведено аналіз стабілізованого перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу. Обґрунтовано безперервну модель системи з урахуванням її особливостей. Визначені параметри незмінної частини під час аналізу схеми заміщення замкнутої структури системи електроживлення для дугового навантаження із від'ємним диференціальним опором. Проведені дослідження розімкнутої системи «джерело живлення - дуга». Встановлено, що розглянута схема з вихідними даними, прийнятими в даній статті, має частотний коефіцієнт передачі такого ж виду, що і немінімально-фазова ланка першого порядку. Отримано частотні характеристики вхідного та вихідного опорів перетворювача, навантаженого на дугу. Бібл. 22, табл. 1, рис. 7.

**Ключові слова:** вхідний та вихідний опір, фільтр, імпеданс, система стабілізації, стійкість, комплексне навантаження.

**Вступ.** У сучасних передових сферах науки, техніки та промисловості широко застосовуються електроплазмові та зварювальні технології, в яких використовуються низькотемпературна плазма (пристрої з від'ємним диференціальним опором). Великий клас таких пристроїв становлять плазмотрони постійного струму. Найчастіше використовуються плазмотрони для різання матеріалів, нагрівання газу, як плазмові системи запалення в камерах горіння газотурбінних двигунів різного призначення і т.д. [1-3]. Тут слід згадати і плазмову плавку, зміцнення металів, плазмохімію, спецметалургію, вирішення екологічних проблем, отримання нових чистих матеріалів, нанесення плівок та покриттів вакуумно-плазмовим методом тощо.

Удосконалення будь-якої електроплазмової технології має починатися з покращення параметрів роботи основного елемента плазмових установок – джерела живлення, що досягається шляхом проектування та конструювання його основних вузлів. Таким чином, дослідження перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу, є не тільки практичним, а й теоретичним інтересом, а також важливою та актуальною науково-прикладною проблемою.

Для аналізу процесів в імпульсних перетворювачах електроенергії використовуються два класи моделей – ключові (імітаційні) та неперервні [4-7]. Неперервні (усереднені) найбільшого поширення набули під час аналізу стійкості замкнутих систем стабілізації з урахуванням імпульсних перетворювачів енергії та синтезі регуляторів цих систем [4-7].

Зауважимо, що диференціальний опір дуги  $R_{diff}$  залежно від знаходження робочої точки на тій чи іншій ділянці ВАХ дуги може набувати як нульових, додатних, так і від'ємних значень. Саме в разі знаходження робочої точки на спадній ділянці ВАХ дуги перетворювач, з урахуванням поведінки об'єкта, становить систему з від'ємним опором. Поведінка таких систем істотно відрізняється від систем, описаних у літературі при постійному навантаженні. В системі з від'ємним опором можуть виникнути нестійкості та автоколивальні режими [8]. Автоколивання, як правило, мають негативні наслідки: погіршення якості технологічного процесу, зниження продуктивності тощо.

Дослідження систем із від'ємним  $R_{diff}$  становить не тільки практичний, а й теоретичний інтерес [8]. Доцільним є вивчення особливостей динаміки розімкнених систем. Це має сенс не тільки через широке застосування їх у практиці, а й тому, що на простих прикладах можна засвоїти використовуваний метод аналізу й показати вплив тих чи інших зовнішніх зворотних зв'язків на динамічні властивості замкнутої

системи щодо розімкненої.

Складність нелінійної дискретної моделі імпульсного перетворювача (точної математичної моделі його), що працює на нелінійне навантаження, робить аналіз останнього в автоматичній системі стабілізації струму (замкнутої системи управління) вкрай важким [5]. У той же час у роботах [1, 5, 6] показано, що при зменшенні періоду комутації  $T$  ( $T \rightarrow 0$ ) нелінійні імпульсні системи наближаються за властивостями до лінійних безперервних систем [1, 5]. Враховуючи високу частоту комутації сучасних перетворювачів для електротехнологій, завдання побудови їх граничних безперервних моделей виявляється дуже перспективним. Усереднені моделі найбільш зручні для практики, оскільки дозволяють застосовувати до нелінійних дискретних систем добре розроблені методи аналізу та синтезу лінійних безперервних систем.

При проектуванні ключових джерел живлення широко застосовують безперервні лінійні моделі імпульсних перетворювачів [1, 5]. У різних роботах обґрунтовані та широко використовуються їх усереднені моделі.

У роботі [9], наприклад, наведені безперервні лінеаризовані моделі основних перетворювачів. Методика їх побудови базується на припущенні відсутності у дроселя активного опору. Крім того, використаний підхід не дозволяє врахувати вихідний опір джерела живлення, фільтр на вході перетворювача тощо.

В роботах [4, 5] зазначено необхідність обліку при аналізі та синтезі систем управління імпульсними перетворювачами активного опору кола дроселя.

Структурні динамічні моделі імпульсних перетворювачів постійної напруги, що працюють на комплексне навантаження з і без урахування опору дроселя, обґрунтовані, наприклад, у роботах [4-7].

В [8] розглянуті загальні питання живлення та взаємодії електричної дуги від джерела напруги, керованого струмом та джерела струму, керованого напругою.

В [10] досліджено джерело живлення зі струмовою характеристикою, яке виконане за наступною блок-схемою: джерело змінного струму – трансформатор – випрямляч – індуктивність, що підключена послідовно з дуговим опором.

Оскільки імпульсний перетворювач, що працює на дугове навантаження, недостатньо вивчений у літературі, завдання цієї статті – побудова безперервної моделі перетворювача та дослідження особливостей його роботи.

Далі робиться спроба виконати аналіз, використовуючи просту безперервну модель перетворювача, що враховує активний опір ключів, дроселя та вихідний опір джерела живлення і працюючого на дугове

навантаження. Передбачається, що регулювання вихідного параметра здійснюється за допомогою ШІМ-2.

**Метою статті** є побудова та дослідження неперервної моделі імпульсного джерела вторинного електроживлення, що працює на електричну зварювальну та плазмову дугу.

**Математичний опис перетворювача.** Схема заміщення системи живлення для електродугового навантаження, що включає навантажений LC-фільтр, коригуючий пристрій (CD), модулятор (M), що реалізує ШІМ-2, імпульсний перетворювач (PC), що формує на вході фільтра імпульси з амплітудою напруги живлення  $nU_{in}$  і тривалістю, яка визначається комутаційною функцією  $k_F$  модулятора, і датчиків напруги VS і струму CS з коефіцієнтами  $k_V$  і  $R_{CS}$  відповідно, зображена на рис. 1, де для спільності показано опір  $R$ , включений паралельно конденсатору  $C$  вихідного фільтра.

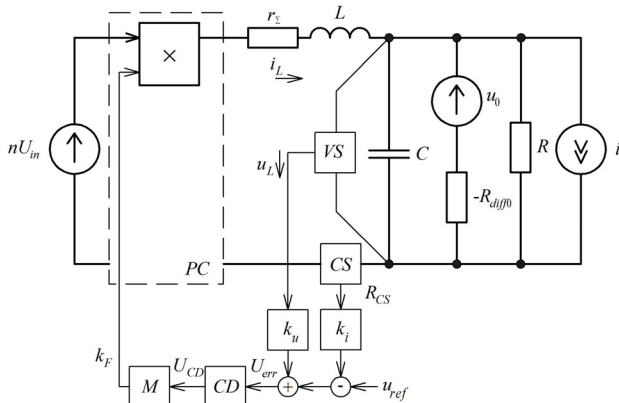


Рис. 1. Схема заміщення замкнутої структури системи електроживлення для дугового навантаження із від'ємним диференціальним опором

На рис. 1:  $i$  – джерело струму, що розглядається як збурення (зміна) струму навантаження. Опір  $r_\Sigma$  включає як вихідні опори перетворювача і випрямляча, так і омичні втрати дроселя фільтра. При цьому опір втрат може залежати від частоти [11-15]. Навантаження (газорозрядний проміжок) є послідовно з'єднані джерело напруги  $U_0$  і динамічний опір  $R_{diff0}$ .

Перетворювач на схемі представлений у вигляді силового чотириполюсника з інформаційним керуванням входом (рис. 1) [5, 16], де  $n = w_{21} / w_1 = w_{22} / w_1$ . Коефіцієнт передачі модулятора PC, який у нашому випадку визначений як  $k_F(t)$ , якщо сигнал помилки не залежить від часу визначається співвідношенням:

$$k_{PWM} = T / U_m,$$

де  $U_m$  – амплітуда (розмах) дробової функції (пилкоподібної напруги),  $T$  – період розгортки.

Зазвичай  $R \gg r_\Sigma$  (зокрема  $R$  відсутній, тобто  $R \rightarrow \infty$ ).

Позначивши за допомогою  $Z_n(s)$  операторний опір паралельного з'єднання  $C$  і  $R_{diff0}$ :

$$Z_n(s) = -R_{diff0} / (1 - sR_{diff0}C) = -R_{diff0} / (-\tau s + 1), \tau > 0,$$

отримаємо наступний вираз передаточної функції (ПФ) вихідного LC-фільтра за напругою:

$$\begin{aligned} K(s) &= \frac{Z_n(s)}{Z_{in}(s)} = \frac{Z_n(s)}{r_\Sigma + sL + Z_n(s)} = \\ &= k_f (s^2 k_f LC + s(L/(r_\Sigma - R_{diff0}) + R_{eq}C) + 1)^{-1} = \\ &= \frac{k_f}{T_f^2 s^2 + 2\xi_f T_f s + 1} = \frac{k_f}{T_f^2 [(s + \alpha_f)^2 + \omega_f^2]}, \end{aligned}$$

де  $\tau = R_{diff0}C > 0$  – стала часу кола вихідного конденсатора;  $R_{eq} = r_\Sigma \parallel (-R_{diff0})$ ;  $k_f = -R_{diff0} / (-R_{diff0} + r_\Sigma) > 0$  – коефіцієнт передачі фільтра на постійному струмі;  $Z_{in}(s)$  – вхідний операторний опір регулятора при  $R = \infty$  у режимі безперервного струму;  $T_f$  і  $\xi_f$  – стала часу та коефіцієнт демпфування фільтра, що визначаються як

$$\begin{aligned} T_f &= \sqrt{k_f LC}; \quad \xi_f = \frac{1}{2} \sqrt{k_f} \left( r_\Sigma \sqrt{C/L} + \frac{1}{R_{diff0}} \sqrt{L/C} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{k_f} (1/Q + d_s) = \frac{1}{2} \sqrt{k_f} (d_r + d_s); \quad \alpha_f = \xi_f / T_f; \\ \omega_f &= \sqrt{1/T_f^2 - \alpha_f^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_f^2}; \quad \omega_0^2 = 1/(k_f LC), \end{aligned}$$

де  $Q = \frac{1}{r_\Sigma} \sqrt{L/C} = \rho / r_\Sigma$  – добротність LC-фільтра без

урахування згасання, що вноситься опором  $R$ , та регенерації;  $d_s = -S_{diff} \sqrt{L/C}$  – регенерація, що вноситься в контур навантаженням (електричною дугою);  $d_r = r_\Sigma \sqrt{C/L}$  – загасання, що вноситься в контур опором;  $\rho = \sqrt{L/C}$  – характеристика контуру, що утворює фільтр;  $d = d_r + d_s$  – повне згасання (регенерація) контуру;  $S_{diff} = 1 / R_{diff0}$  – диференціальна крутість ВАХ дуги.

Для схеми на рис. 1 рівняння, що визначає струм у дроселі фільтра  $\tilde{i}_L$  буде таким:

$$Z(s) \tilde{i}_L = nD \tilde{u}_{in} + nU_{in} \tilde{d} + Z_n(s) \tilde{i} - (Z_n(s) / R_{diff0}) \tilde{u}_0,$$

де

$$Z(s) = \frac{Z_n(s)}{K(s)} = \frac{R_{diff0} [s^2 k_f LC + s \left( \frac{L}{r_\Sigma - R_{diff0}} + R_{eq}C \right) + 1]}{k_f (-\tau s + 1)};$$

символ « $\sim$ » показує нескінченно малу зміну змінної щодо значення в періодичному режимі;  $d = 2t_p / T$  – коефіцієнт заповнення;  $D$  – значення коефіцієнта заповнення у встановленому (періодичному) режимі [17-20].

При  $C = 0$  останнє рівняння набуде вигляду

$$\tilde{i}_L = k_f \frac{\tilde{i} - \tilde{u}_0 / R_{diff0} + (nD / R_{diff0}) \tilde{u}_{in} + (nU_{in} / R_{diff0}) \tilde{d}}{s[L/(r_\Sigma - R_{diff0})] + 1}.$$

Вибравши в якості вихідної змінної струм дуги  $i_{arc} = i_n$ , який не збігається зі змінною стану, отримаємо передаточні функції по керуючому впливу «струм дуги – керуючий сигнал»:

$$\frac{\tilde{I}_{arc}(s)}{\tilde{d}(s)} = nU_{in} \frac{Z_n(s)}{Z_1(s) + Z_n(s)} S_{diff} = nU_{in} K(s) S_{diff},$$

і по збурювальним впливам – чутливість струму дуги до зміни вхідної напруги  $u_{in}$  і до струму, що збурює,  $i$  і напруги  $u_0$ :

$$\frac{\tilde{I}_{arc}(s)}{\tilde{U}_{in}(s)} = nDK(s) S_{diff}; \quad \frac{\tilde{I}_{arc}(s)}{\tilde{I}(s)} = -Z_1(s) K(s) S_{diff};$$

$$\frac{\tilde{I}_{arc}(s)}{\tilde{U}_0(s)} = -(s^2 LC + sr_\Sigma C + 1) K(s) S_{diff},$$

де  $Z_1(s) = Ls + r_\Sigma$  – операторний опір кола дроселя.

**Визначення параметрів незмінної частини схеми.** Знайдемо складові коефіцієнта посилення

незмінної частини. Вибравши крутизну датчика струму  $R_{CS} = 0,75$  мОм, визначаємо відносний коефіцієнт сигналу  $CS$   $k_i = 82$  та коефіцієнт посилення ШІМ

$$k_{PWM} / T = F(T/U_m)(1/T) = F/U_m = 1/2,5 = 0,4 \text{ В}^{-1},$$

де фактор пульсацій  $F$  прийнятий рівним 1;  $U_m = 2,5$  В – амплітуда (розмах) пилоподібної напруги.

Коефіцієнт посилення незмінної частини при  $k_f = 1$  та  $F = 1$

$$k_0 = k_i k_{PWM} n U_{in} (R_{CS} / -R_{diff0}) / T =$$

$$= -82 \cdot 250 \cdot 0,4 \cdot 75 \cdot 10^{-5} / 0,49 = -12,55.$$

Частоту перемикачів прийнято рівною 26 кГц, індуктивність дроселя вихідного LC-фільтра –  $L = 300$  мкГн, а ємність вихідного конденсатора, що залежить від вимог, що висуваються –  $C = 3$  мкФ,  $r_{\Sigma} = 0,01$  Ом,  $R_{diff0} = -0,49$  Ом [21].

**Дослідження розімкнутої системи «джерело живлення – дуга».** Створимо об'єкти *MATLAB* – безперервні математичні моделі нашого об'єкта у формі передаточних функцій (*transfer function form*). Відповідно буде наступний результат у командному вікні (табл. 1).

Таблиця 1

Передаточні функції об'єкта	
№	Передаточна функція*
1	$\frac{416.4}{9 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 - 0.000612 \cdot s + 1}$
2	$\frac{208.2}{9 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 - 0.000612 \cdot s + 1}$
3	$\frac{-0.000612 \cdot s + 416.4}{9 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 - 0.000612 \cdot s + 1}$
4	$\frac{-0.000306 \cdot s + 208.2}{9 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 - 0.000612 \cdot s + 1}$

\*варіанти 1, 2 – ПФ «струм дуги – керуючий сигнал» з  $k_{CR} = 33,18$  та  $k_{CR} = 16,59$ ; варіанти 3, 4 – ПФ «струм дроселя – керуючий сигнал» з  $k_{CR} = 33,18$  та  $k_{CR} = 16,59$ .

Для ПФ об'єкта 3-4 показники дорівнюють: порядок та індекс нестійкості дорівнюють двом  $n = s_n = 2$ , ступінь  $r_C = n - m = 2 - 1 = 1$ , індекси аперіодичної та коливальної нейтральності дорівнюють нулю  $s_a = s_v = 0$ , індекс немінімально-фазовості  $s_{nf} = 1$ , коефіцієнт посилення  $k = k_0 k_{CR}$ . Завдання цих показників та коефіцієнта посилення  $k$  відображає суттєві риси ПФ  $W(s)$  та ними можна характеризувати ті чи інші властивості системи, що визначаються цією ПФ [22].

Перехідні характеристики (ПХ) для варіантів 1, 3 показано на рис. 2. Розімкнуті системи нестійкі  $s_n = 2 > 0$ . Діаграми Найквіста для розглянутих варіантів показано на рис. 3. Як свідчить рис. 3, АЧХ жодного разу не охоплює точку  $-1, j0$ , тому замкнуті системи також нестійкі.

Вхідний опір силової частини (СЧ) відповідно до схеми на рис. 1 в операторній формі

$$Z_{i0}(s) = -(R_{diff0} - r_{\Sigma}) \frac{s^2 k_f LC + s(-L/(R_{diff0} - r_{\Sigma}) - R_{eq}C) + 1}{- \tau_C s + 1},$$

де  $\tau_C = R_{diff0}C > 0$  – стала часу кола вихідного конденсатора;  $R_{eq} = r_{\Sigma} \parallel (-R_{diff0})$ ;  $k_f = R_{diff0} / (R_{diff0} - r_{\Sigma})$  – коефіцієнт передачі фільтра на постійному струмі.

Легко показати, що її вихідний опір визначається виразом

$$Z_{00}(s) = k_f \frac{sL + r_{\Sigma}}{s^2 k_f LC + s(-L/(R_{diff0} - r_{\Sigma}) + R_{eq}C) + 1}.$$

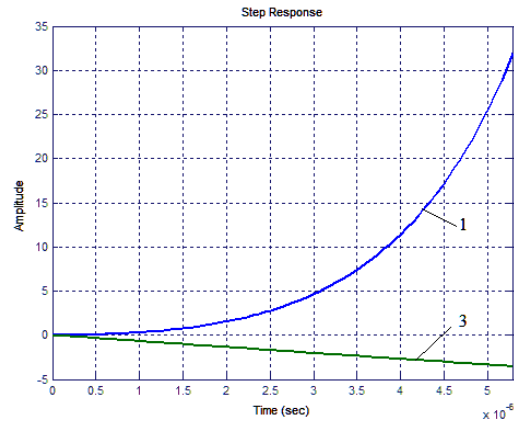


Рис. 2. Графіки ПХ нестійких систем: варіант 1 (1), варіант 3 (3)

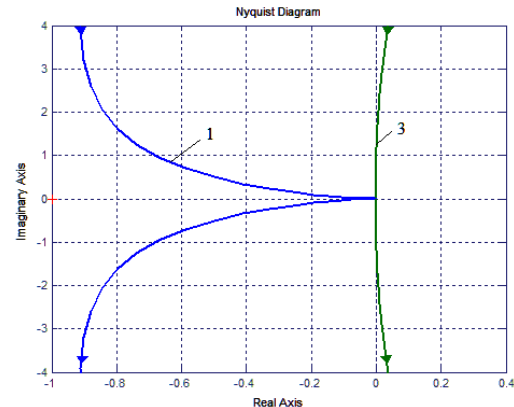


Рис. 3. Діаграми Найквіста для нестійких систем: варіант 1 (1), варіант 3 (3)

Оскільки опір втрат досить малий, то

$$Z_{00}(s) = \frac{s/C}{s^2 - s/(R_{diff0}C) + 1/(LC)}. \quad (1)$$

Помітивши, що у загальному випадку  $1/\sqrt{LC} = \omega_0$  – частота власних коливань контуру без втрат і  $\alpha = -0,5S_{diff} / C = -0,5\omega_0 Q$  – коефіцієнт загасання контуру, переписемо вираз наступним чином (при цьому основні умови вибиралися так, щоб могли виникнути нестійкості)

$$Z_{00}(s) = \frac{s/C}{s^2 - 2\alpha s + \omega_0^2} \quad (\alpha > 0).$$

В цьому випадку  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = (\sqrt{300 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6}})^{-1} = 33,33 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  або  $f_0 = 5,307$  кГц.

Отже, у разі нестійкості частота заповнення автоколивань, що виникають у лінійному режимі, близька до частоти власних коливань контуру  $f_0$ .

Якщо  $C = 0$ , то

$$Z_{00}(s) = sL(-\tau_{load}s + 1)^{-1}, \quad (2)$$

де  $\tau_{load} = L / R_{diff0} > 0$  – стала часу кола навантаження.

Варіанти (рис. 4) залежностей модуля і аргументу вхідного опору СЧ імпульсного джерела електроживлення з паралельною ємністю електричної дузі і без неї мають частотні характеристики (ЧХ), що збігаються.

Близькість ЧХ свідчить про подібність і малі відмінності в перехідних процесах за основними показниками якості. Таким чином, схема, що розглядається з вихідними даними, прийнятими в даній статті, має час-

тотний коефіцієнт передачі такого ж виду, що і немінімально-фазова (фазоопережувальна) ланка першого порядку

$$Z(j\omega) = k(\tau j\omega - 1),$$

де  $k = R_{diff}$ ,  $\tau = L / R_{diff} > 0$ .

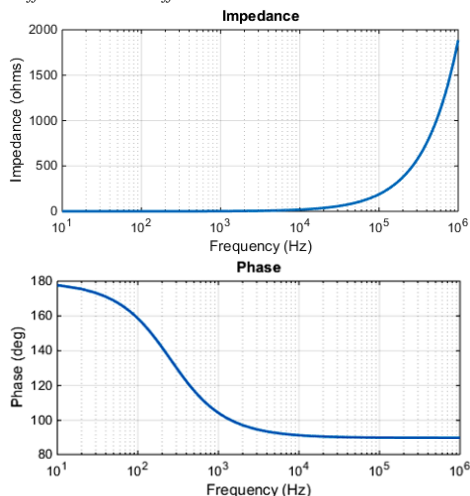


Рис. 4. Частотні характеристики вхідного імпедансу СЧ джерела живлення, навантаженого на електричну дугу, для  $C = 0$  та  $C = 3$  мкФ

Графіки АЧХ для вхідного імпедансу СЧ, побудовані відповідно до виразів (1), (2), зображені на рис. 5. Зазначимо, що за  $C \neq 0$  дана СЧ є широкосмуговою частотно-вибірчою системою ( $B_{0.707} / f_0 \gg 1$ ) зі смугою пропускання  $B_{0.707} = 100$  кГц.

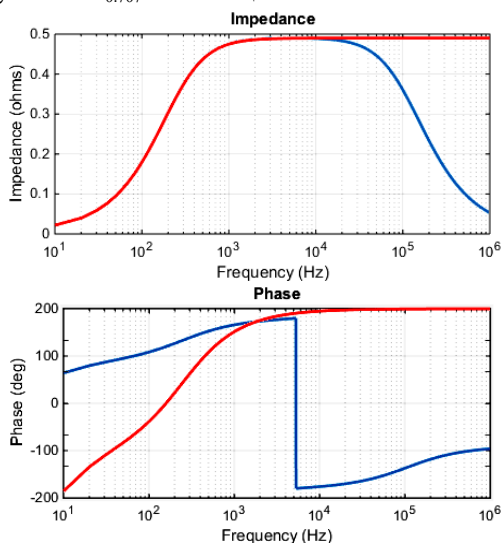


Рис. 5. Графіки АЧХ (вгорі) та ФЧХ (внизу) вхідного імпедансу контуру

Логарифмічні характеристики модуля та фази вхідної провідності СЧ  $PC$  для випадку відсутності ємності на виході імпульсного стабілізатора струму – нестійкого з від'ємним самовирівнюванням аперіодичної ланки

$$Y_{i0}(s) = 1/Z_{i0}(s) = k(-1 + \tau s)^{-1} \quad (3)$$

побудовані на рис. 6,а; діаграма Найквіста показана на рис. 6,б. Асимптотична характеристика має, згідно (3), злам у точці  $\omega_1 = 1 / \tau$ . Смуга пропускання 0 – 465 Гц.

На рис. 7 наведено амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики системи «джерело живлення – дуга» в розімкнутому стані.

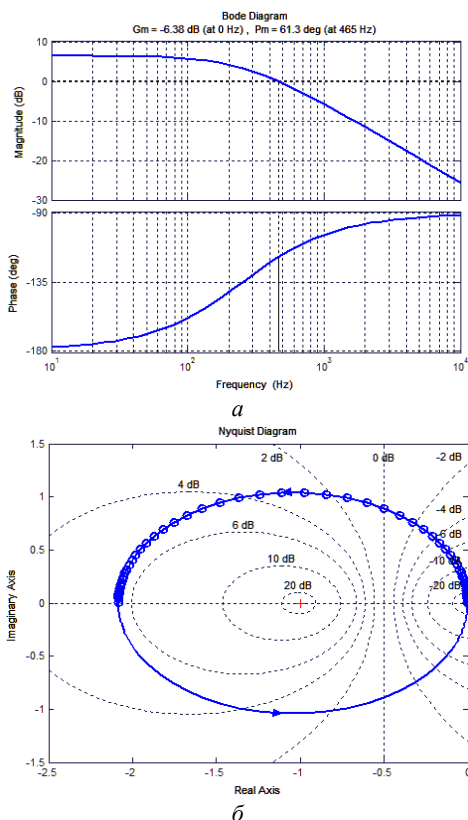


Рис. 6. Модуль та аргумент вхідного адмітансу СЧ (а); годограф Найквіста для даного випадку (б)

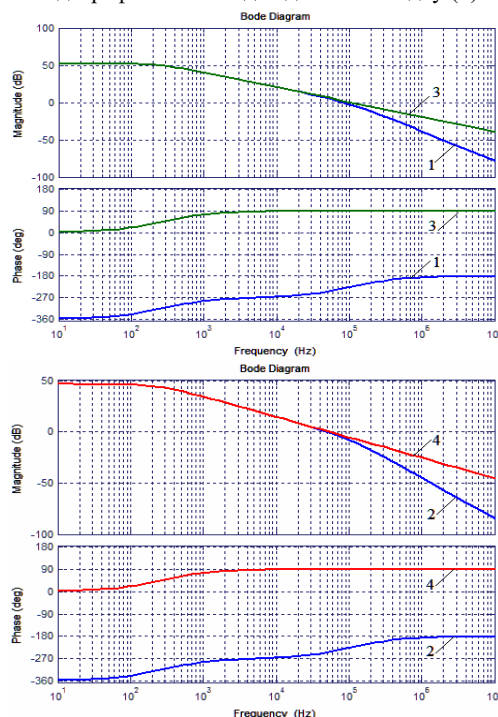


Рис. 7. АФЧХ розімкненого контуру імпульсного стабілізатора струму при керуванні за вихідним струмом  $i_{arc}$  (1-2) і струмом дроселя  $i_L$  (3-4)

З наведених на рис. 7 графіків випливає, що замкнена система для розглянутих варіантів виявиться нестійкою ( $L(\omega) > 0$ ,  $\varphi_{margin}(\omega) < 0$ ;  $L \rightarrow \infty$ ,  $\varphi_{margin} = -51,9^\circ \div 90,2^\circ$ ), що вносить додаткові складності у побудову схеми керування перетворювачем [21].

З характеру  $\varphi(\omega)$  та  $A(\omega)$  (рис. 7) випливає, що побудова замкнутих систем стабілізації струму роз-

глянутого перетворювача викликає труднощі, оскільки забезпечити достатній запас стійкості при високому коефіцієнті посилення в замкнутому контурі дуже складно через дуже швидке збільшення фазового зсуву (кут  $|\varphi|$  перевищує  $180^\circ$ ) при практично незмінній АЧХ перетворювача.

Таким чином, розглянуті безперервні моделі можуть використовуватися в процесі проектування пристроїв на основі імпульсних перетворювачів напруги для навантажень з від'ємним диференціальним опором: джерел вторинного електроживлення тощо, проводити дослідження основних властивостей цих перетворювачів.

#### Висновки.

1. Методом усереднення та лінеаризації отримані вирази для частотної передаточної функції, вхідного та вихідного опору імпульсного перетворювача напруги, що працює на дугове навантаження з від'ємним диференціальним опором.

2. Передаточні функції перетворювача з виходом за струмом дуги і струмом дроселя не є мінімально фазовими. Цим пояснюється характер фазових характеристик перетворювача і складність синтезу регуляторів струму для нього.

3. Досліджено частотні амплітудні та фазові характеристики для імпульсного перетворювача напруги з виходом по струму дуги та струму дроселя.

4. Передаточні функції безперервної моделі за струмом дуги та струмом дроселя при заданих параметрах однакові, що необхідно враховувати під час проектування регуляторів.

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. *Моделирование источников питания для электроплазменных и сварочных технологий*. LAP Lambert Academic Publishing, 2022. 112 с.
2. Paton B. E. Advanced studies and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of welding and related technologies. *Automatic Welding*, 2018, vol. 11-12, pp. 5-18. doi: <https://doi.org/10.15407/as2018.12.01>.
3. Верещаго Е.Н., Квасницький В.Ф., Мирошниченко Л.Н., Пентегов И.В. *Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки*. Николаев: УГМТУ, 2000. 283 с.
4. Денисюк С.П., Дерев'яноко Д.Г. *Промислова електроніка. Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 95 с.
5. Лазарев Ю.Ф. *Моделювання динамічних систем у MATLAB. Електронний навчальний посібник*. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.
6. Гаєвський О.Ю., Іванчук В.Ю. *Основи перетворювальної техніки. Практикум*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 63 с.
7. Бондар Р.П., Подольцев О.Д. *Моделювання електротехнічних пристроїв*. К.: КНУБА, 2012. 391 с.
8. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. 272 с.
9. Chetty P.R.K. *Switch-mode Power Supply Design*. Tab Professional and Reference Books, 1986. 179 p.
10. Волков И.В., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Устойчивость системы источник тока – электрическая дуга с отрицательным дифференциальным сопротивлением. *Технічна електродинаміка*, 1998, №4, с. 43-45.
11. Vereshchago E., Kostiuchenko V., Hrieshnov A. Calculation and Analysis of Dynamic Properties of a Soft Switching Converter under Operation on the Arc Load. *2020 IEEE 40th International Conference*

on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 820-825. doi: <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088776>.

12. Chen G., Sun Q., Hu T., Guo Q. A Novel Digital Control Algorithm for a DC-DC Converter in Plasma Application. *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5748827>.

13. Pastor M., Dudrik J., Revak O. High-Frequency soft-switching DC-DC converter with full-bridge output rectifier. *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2016, pp. 110-115. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPMC.2016.7751983>.

14. Bordry F. Power converters: definitions, classification and converter topologies. In *Proc. CAS-CERN Accelerator School and CLRC Daresbury Laboratory: Specialized CAS Course on Power Converters*, Warrington, UK, 2004, pp. 13-41.

15. Zulauf G., Tong Z., Plummer J.D., Rivas-Davila J.M. Active Power Device Selection in High- and Very-High-Frequency Power Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 7, pp. 6818-6833. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2874420>.

16. Kwon M.-J., Kim T.-H., Lee W.-C. Analysis of the Gain Characteristic in LLC Resonant Converter for Plasma Power Supply. *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2016, vol. 65, no. 12, pp. 1992-1999. doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.12.1992>.

17. Suntio T., Hankaniemi M., Karppanen M. Analysing the dynamics of regulated converters. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2006, vol. 153, no. 6, pp. 905-910. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050481>.

18. Hankaniemi M., Suntio T., Sippola M., Oyj E. Load-Impedance Based Interactions in Regulated Converters. *INTELEC 05 - Twenty-Seventh International Telecommunications Conference*, 2005, pp. 569-573. doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEEC.2005.335161>.

19. Lee B.-H., Kim M.-Y., Kim C.-E., Park K.-B., Moon G.-W. Analysis of LLC Resonant Converter considering effects of parasitic components. *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, 2009, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEEC.2009.5351740>.

20. Hankaniemi M., Suntio T. Dynamical Modeling and Control of Current-Output Converters. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 197-206. doi: <https://doi.org/10.15866/irecon.v7i5.18544>.

21. Vereshchago E., Kostiuchenko V., Novogretskyi S. Analysis of dynamic characteristics of the inverter operating on a complex load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 5, no. 5(107), pp. 23-31. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215145>.

22. Кунцевич В.М., Чеховой Ю.Н. *Нелинейные системы управления с частотно- и широтно-импульсной модуляцией*. К.: Техніка, 1970. 340 с.

#### REFERENCES

1. Vereshchago E.N., Kostiuchenko V.I. *Modeling of power sources for electroplasma and welding technologies*. LAP Lambert Academic Publishing, 2022. 112 p. (Rus).
2. Paton B. E. Advanced studies and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of welding and related technologies. *Automatic Welding*, 2018, vol. 11-12, pp. 5-18. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/as2018.12.01>.
3. Vereshchago E.N., Kvasnitsky V.F., Miroshnichenko L.N., Pentegov I.V. *Circuitry of inverter power supplies for arc load*. Nikolaev, UGMTU Publ., 2000. 283 p. (Rus).
4. Denisyuk S.P., Derevyanko D.G. *Industrial electronics. Modeling of power electronics devices in MATLAB Simulink*. Kyiv, Igor Sikorskyi KPI Publ., 2019. 95 p. (Ukr).
5. Lazarev Yu.F. *Modeling of dynamic systems in MATLAB. Electronic study guide*. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2011. 421 p. (Ukr).
6. Gaevskiy O.Yu., Ivanchuk V.Yu. *Basics of conversion technology*. Kyiv, KPI named after I. Sikorskyi Publ., 2023. 63 p. (Ukr).
7. Bondar R.P., Podoltsev O.D. *Modeling of electrical devices*. Kyiv, KNUBA Publ., 2012. 391 p. (Ukr).

8. Sidorets V.N., Pentegov I.V. *Deterministic chaos in non-linear circuits with an electric arc*. Kyiv, International Association «Welding», 2013. 272 p. (Rus).
9. Chetty P.R.K. *Switch-mode Power Supply Design*. Tab Professional and Reference Books, 1986. 179 p.
10. Volkov I.V., Gubarevich V.N., Spirin V.M. Stability of the system current source - an electric arc with a negative differential resistance. *Technical Electrodynamics*. 1998, no. 4, pp. 43-45. (Rus).
11. Vereshchago E., Kostiuchenko V., Hrieshnov A. Calculation and Analysis of Dynamic Properties of a Soft Switching Converter under Operation on the Arc Load. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 820-825. doi: <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088776>.
12. Chen G., Sun Q., Hu T., Guo Q. A Novel Digital Control Algorithm for a DC-DC Converter in Plasma Application. *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5748827>.
13. Pastor M., Dudrik J., Revak O. High-Frequency soft-switching DC-DC converter with full-bridge output rectifier. *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2016, pp. 110-115. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7751983>.
14. Bordry F. Power converters: definitions, classification and converter topologies. In *Proc. CAS-CERN Accelerator School and CLRC Daresbury Laboratory: Specialized CAS Course on Power Converters*, Warrington, UK, 2004, pp. 13-41.
15. Zulauf G., Tong Z., Plummer J.D., Rivas-Davila J.M. Active Power Device Selection in High- and Very-High-Frequency Power Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 7, pp. 6818-6833. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2874420>.
16. Kwon M.-J., Kim T.-H., Lee W.-C. Analysis of the Gain Characteristic in LLC Resonant Converter for Plasma Power Supply. *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2016, vol. 65, no. 12, pp. 1992-1999. doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.12.1992>.
17. Suntio T., Hankaniemi M., Karppanen M. Analysing the dynamics of regulated converters. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2006, vol. 153, no. 6, pp. 905-910. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050481>.
18. Hankaniemi M., Suntio T., Sippola M., Oyj E. Load-Impedance Based Interactions in Regulated Converters. *INTELEC 05 - Twenty-Seventh International Telecommunications Conference*, 2005, pp. 569-573. doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2005.335161>.
19. Lee B.-H., Kim M.-Y., Kim C.-E., Park K.-B., Moon G.-W. Analysis of LLC Resonant Converter considering effects of parasitic components. *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, 2009, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5351740>.
20. Hankaniemi M., Suntio T. Dynamical Modeling and Control of Current-Output Converters. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 197-206. doi: <https://doi.org/10.15866/irecon.v7i5.18544>.
21. Vereshchago E., Kostiuchenko V., Novogretskyi S. Analysis of dynamic characteristics of the inverter operating on a complex load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 5, no. 5(107), pp. 23-31. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215145>.
22. Kuntsevich V.M., Chekhovoy Yu.N. *Nonlinear control systems with frequency and pulse width modulation*. Kyiv, Tekhnika Publ., 1970. 340 p. (Rus).

Надійшла (Received) 08.11.2022

Прийнята (Accepted) 07.02.2023

Опублікована (Published) 01.09.2023

#### How to cite this article:

Vereshchago E.M., Kostiuchenko V.I., Novogretskyi S.M. Analysis of a DC converter working on a plasma arc. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 31-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05>

Верещаго Євген Миколайович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Костюченко Віталій Іванович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Новогрещький Сергій Миколайович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова,  
54025, Миколаїв, пр. Героїв України, 9,  
e-mail: venmkua@gmail.com;  
vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua (Corresponding Author);  
sergii.novogretskyi@nuos.edu.ua

E.M. Vereshchago<sup>1</sup>, V.I. Kostiuchenko<sup>1</sup>, S.M. Novogretskyi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
9, Heroyiv Ukraine Ave, Mykolaiv, 54025, Ukraine.

#### Analysis of a DC converter working on a plasma arc.

**Introduction.** The article is devoted to the analysis of a stabilized direct current converter operating on a plasma arc. Electroplasma technologies of the new generation cause the need to design workable systems that provide control of technological processes and their dynamic optimization in real time. The improvement of any electroplasma technology begins with the improvement of the operating parameters of the main element of plasma installations – the power source. **Goal** is to build and study a continuous model of a pulsed source of secondary power supply, which works on an electric welding and plasma arc.

**Methodology.** In the work, a mathematical description of the converter was performed. The continuous model of the system is substantiated, taking into account its features, namely, the load (gas-discharge gap) is a source of voltage and dynamic resistance. The parameters of the constant part during circuit synthesis are determined: the components of the gain of the constant part, the relative signal coefficient of the current sensor and the PWM gain. Studies of the open system «power source - arc» have been carried out. **Results.** MATLAB objects were created - continuous mathematical models of the object in the form of transfer functions. The obtained transient characteristics for different options: «arc current - control signal» and «inductor current - control signal» showed that open systems are unstable. It was found that in the case of instability, the filling frequency of self-oscillations occurring in the linear mode is close to the frequency of natural oscillations of the circuit. The dependence of the module and the argument of the input resistance of the power part of the pulsed power supply with parallel capacitance to the electric arc and without it, which have matching frequency characteristics, is established. The circuit considered with the initial data adopted in this article has a frequency transfer coefficient of the same type as the first-order non-minimum-phase (phase-shifting) link. Frequency response graphs for the output impedance of the power unit show that this power unit is a broadband frequency-selective system with a bandwidth of  $B_{0,707} = 100$  kHz. **Originality.** Expressions for the frequency transfer function, input and output resistance of the pulse voltage converter operating on an arc load were obtained by the method of averaging and linearization. The frequency amplitude and phase characteristics for the pulse voltage converter with an LC filter and the output according to the arc current and the choke current were studied. The transfer functions of the continuous model in terms of arc current and choke current at the specified parameters are the same, which must be taken into account when designing regulators. **Practical significance.** The frequency characteristics of the input and output resistances and transfer functions can be used when forming a technical task for designing a power source to assess the stability of the «pulse converter - arc» system and rational calculation of input filters. References 22, tables 1, figures 7.

**Key words:** input and output resistance, filter, impedance, stabilization system, stability, complex load.