

УДК 004:681.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).28](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).28)

CASCADED BUILD-UP OF ACTIVE ENERGY FILTERS WITH SEQUENTIAL COMPENSATION

КАСКАДНЕ НАРОЩУВАННЯ АКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ ІЗ ПОСЛІДОВНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ

Volodymyr M. Ryabenkyi
optron2@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6998-746X

Serhii L. Trybulkevich
sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5783-6616

Irina M. Khudiakova
irinakhud@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2677-7841

Oleg S. Kudriavtsev
trveyrtgynertvhyn@gmail.com

В. М. Рябенський,
докт. техн. наук, професор

С. Л. Трибулькевич,
старший викладач

І. М. Худякова,
канд. пед. наук, доцент

О. С. Кудрявцев,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. To investigate the efficiency of cascade build-up of active power filters with sequential inclusion of compensating voltage, to determine the conditions of their stability, mutual influence between cascades, and to find ways to increase the efficiency of filtration in power systems.

Methodology. Analysis of the structural diagram of a two-stage active filter with the identification of positive feedback between cascades. Modeling of the filter in the Multisim software environment, with the selection of parameters.

Results. The conditions for ensuring the stability of both individual cascades and the entire two-stage structure were identified. An analytical expression was obtained for assessing the efficiency taking into account the passive component and gain coefficients. It was shown that when analyzing the stability of cascades of an active power filter, special attention should be paid to the low-frequency region of the desired logarithmic amplitude-frequency characteristic. It was shown that the total ripple smoothing coefficient is determined by the product of the gain coefficients of the cascades. The filtering efficiency of each cascade was confirmed using oscillograms.

Scientific novelty. For the first time, a study of the efficiency of cascade connection of active power filters with sequential switching on of the compensating voltage relative to the load was carried out. It was found that, like passive filters, there is interaction between the stages of the active filter, which can not only reduce the efficiency of individual stages, but also cause self-oscillations both in individual filters and in the two-stage system as a whole. A new structural model was developed that takes into account the interaction between individual elements, and it was analyzed how the gain coefficients affect the overall efficiency of the filter.

Practical significance. The developed model allows for optimal design of active power filters with increased efficiency. The recommended parameters and modeling methodology can be used in the practice of designing ripple compensation systems in power supply systems with increased requirements for output voltage stability.

Key words: high-precision power supply; active filter; compensation; cascade connection; ripples.

Анотація. Мета. Дослідити ефективність каскадного нарощування активних енергетичних фільтрів із послідовним включенням компенсуючої напруги, визначити умови їх стійкості, взаємного впливу між каскадами, а також знайти способи підвищення ефективності фільтрації в енергетичних системах.

Методика. Аналіз структурної схеми двокаскадного активного фільтра з виявленням позитивних зворотних зв'язків між каскадами. Моделювання фільтра в програмному середовищі Multisim, з підбором параметрів.

Результати. Виявлені умови забезпечення стійкості як окремих каскадів, так і всієї двокаскадної структури. Отримано аналітичний вираз для оцінки ефективності з урахуванням пасивної складової та коефіцієнтів під-

силення. Показано, що при аналізі стійкості каскадів активного енергетичного фільтра особливу увагу слід приділяти низькочастотній ділянці бажаної логарифмічної амплітудно – частотної характеристики.

Показано, що загальний коефіцієнт згладжування пульсацій визначається добутком коефіцієнтів підсилення каскадів. Підтверджено ефективність фільтрації кожного каскаду за допомогою осцилограм.

Наукова новизна. Вперше здійснено дослідження ефективності каскадного підключення активних енергетичних фільтрів із послідовним увімкненням компенсуючої напруги відносно навантаження. Виявлено, що, подібно до пасивних фільтрів, між каскадами активного фільтра існує взаємодія, яка може не лише знижувати ефективність окремих каскадів, але й спричиняти автоколивання як в окремих фільтрах, так і в двокаскадній системі загалом. Розроблено нову структурну модель, яка враховує взаємодію між окремими елементами, та проаналізовано, як коефіцієнти підсилення впливають на загальну ефективність роботи фільтра.

Практична значимість. Розроблена модель дозволяє здійснювати оптимальне проектування активних енергетичних фільтрів з підвищеною ефективністю. Рекомендовані параметри та методика моделювання можуть бути використані в практиці проектування систем компенсації пульсацій в системах електроживлення з підвищеними вимогами до стабільності вихідної напруги.

Ключові слова: високоточне джерело живлення; активний фільтр; компенсація; каскадне включення; пульсації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачі підвищення енергоефективності вторинних джерел живлення завжди є актуальними, оскільки вони є найбільш енергозатратними і, відповідно, найменш надійними в будь-яких електронних системах. В той же час зростаючі вимоги до стабільності випрямленої напруги і зменшення її пульсацій приводять до зростання масогабаритних показників вторинних джерел живлення.

Одним з напрямків зменшення масогабаритних показників фільтрів вищих гармонік випрямленої напруги є використання активних енергетичних фільтрів з включенням компенсуючого трансформатора послідовно з навантаженням в первинну обмотку якого подається підсилена напруга пульсацій, що знімається з навантаження. На жаль ефективність таких фільтрів обмежується стійкістю підсилювача як в діапазоні високих, так і низьких частот. Тому постає питання каскадного нарощування таких фільтрів з обмеженою ефективністю і мінімальним взаємним впливом кожного з АЕФ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Регульовані джерела живлення постійного струму широко використовуються у навчанні, наукових дослідженнях, промисловому виробництві та інших сферах. Точність джерела живлення в автоматизованих тестових системах впливає на якість результатів вимірювань [10].

У сучасній електроніці зростає потреба у забезпеченні стабільності вихідної напруги вторинних джерел живлення, особливо в умовах наявності різного роду завад, шумів і паразитних складових. Особливої актуальності ця проблема набуває у вимірювальному та медичному обладнанні, системах живлення АЦП [1, 7], джерелах опорної напруги [2], аудіосистемах високої якості [15]

Сучасні перетворювачі живлення потребують високих частот перемикавання, новітніх топологій схем

та високошвидкісних силових компонентів. Електромагнітні перешкоди є все більш важливою та складною проблемою для перетворювачів з швидким перемиканням [9, 12, 13]. Крім того, фільтри перешкод, як по входу, так і по виходу перетворювача, можуть становити значну частину загального розміру, об'єму та вартості системи.

У системах керування джерелами живлення високої потужності [8] пульсації від комутації силових ключів можуть створювати перешкоди в роботі вимірювальної частини схеми, тому виникає необхідність фільтрації та стабілізації напруги живлення інформаційно-керуючої частини обладнання.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У попередніх дослідженнях, присвячених активним енергетичним фільтрам, як правило, розглядалася робота окремих фільтрів без урахування їх каскадного поєднання. Недостатньо досліджена проблема взаємного впливу між каскадами при їх послідовному включенні відносно навантаження, зокрема вплив цих взаємодій на стійкість та ефективність фільтрації. Також необхідно виконати аналіз умов виникнення автоколивань у двокаскадних структурах та механізмів їх уникнення.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідити ефективність каскадного нарощування активних енергетичних фільтрів із послідовним включенням компенсуючої напруги, визначити умови їх стійкості, взаємного впливу між каскадами, а також знайти способи підвищення ефективності фільтрації в енергетичних системах шляхом структурного аналізу, виявлення зворотних зв'язків, розробки математичної моделі та визначення впливу коефіцієнтів підсилення на загальну ефективність. Особливу увагу приділити аналізу частотних характеристик, зокрема низькочастотної ділянки ЛАЧХ, і розробці практичних рекомендацій щодо корекції фільтрів з урахуванням властивостей підсилювачів, а також створити

і верифікувати модель фільтра в середовищі Multisim з подальшим експериментальним підтвердженням отриманих результатів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження – для вирішення поставлених завдань використовуються методи системного аналізу структур активних енергетичних фільтрів та їх каскадного з'єднання; математичне моделювання взаємодії каскадів, включаючи виведення аналітичних виразів для оцінки ефективності та стійкості; моделювання для практичної перевірки роботи двокаскадної фільтраційної структури; частотний аналіз (зокрема аналіз ЛАЧХ) з метою оцінки динамічної стійкості та необхідності частотної корекції.

Об'єкт дослідження – системи активної фільтрації електричної енергії в силових електронних пристроях.

Предмет дослідження – каскадне нарощування активних енергетичних фільтрів з послідовним увімкненням компенсуючої напруги, їх динамічна взаємодія, умови стійкості та вплив параметрів підсилювачів на ефективність фільтрації.

Проблема, що вирішується, – пошук ефективної архітектури активного енергетичного фільтра з каскадною структурою, що дозволяє уникнути негативного взаємного впливу між каскадами, запобігти виникненню автоколивань, підвищити ефективність фільтрації пульсацій випрямленої напруги та забезпечити стійкість роботи фільтра в широкому частотному діапазоні.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Схема фільтра приведена на рис. 1. Схема фільтрації базується на трансформаторі Т1, вторинна обмотка якого послідовно з'єднана з джерелом живлення, що фільтрується. Таким чином, вторинна напруга віднімається від вхідної напруги, і якщо вона точно дорівнює напрузі пульсацій, відбудеться ідеальне придушення, що призведе до чистого постійного струму на виході [3]. Схожі схемотехнічні рішення використовуються у якості вхідних фільтрів джерел живлення постійного струму, які забезпечують компенсацію як реактивної, так і спотворювальної потужності, яка генерується зовнішнім навантаженням, підключеним до того ж вузла електромережі [11, 14].

Для отримання схеми заміщення фільтруючого пристрою (рис. 1,б) підсилювачі ДА-1, ДА-2 з трансформаторами Тр1, Тр2 замінюються відповідно джерелами з ЕРС компенсації $\dot{e}_{K1}$, $\dot{e}_{K2}$ і внутрішніми опорами $Z_{K1,2} = j\omega L_2 (1 + j\omega L_2 / R_{A1,2}^*)^{-1}$.

Струм у навантаженні відповідно до рис. 1,б можна визначити з виразу:

$$I_H = \frac{Z_{C2}}{Z_{K1} \cdot Z_{C2} + (Z_{K1} + Z_{C2})(Z_{K2} + Z_H)}$$

$$\left(U_{C1} - e_{K1} - e_{K2} \frac{Z_{C2} + Z_{K1}}{Z_{C2}} \right); \quad (1)$$

$$U_{C1} = \frac{\dot{e}_n Z_1^3 + \dot{e}_{K1} Z_2^3 + \dot{e}_{K2} Z_n Z_{C1} Z_{C2}}{Z_\Sigma^3}, \quad (2)$$

$$\text{де } Z_1^3 = Z_n [Z_{K1} Z_{C2} + (Z_{K1} + Z_{C2})(Z_{K2} + Z_H)];$$

$$Z_2^3 = Z_n Z_{C1} (Z_{C2} + Z_{K2} + Z_H);$$

$$Z_\Sigma^3 = [Z_n Z_{C1} + (Z_{C1} + Z_n)(Z_{K1} + Z_{C2})](Z_{K2} + Z_H) + Z_{C2} [Z_{C1} Z_n + Z_{K1} (Z_{C1} + Z_n)];$$

$$Z_n = j\omega L_\phi; \quad Z_{C1} = (j\omega C_1)^{-1}; \quad Z_{C2} = (j\omega C_2)^{-1};$$

$$Z_H = R_H + j\omega L_H;$$

$$\dot{e}_{K1} = K_{A1}(j\omega)U_{C2}; \quad \dot{e}_{K2} = K_{A2}(j\omega)U_H.$$

$K_{A1}(j\omega)$, $K_{A2}(j\omega)$ – коефіцієнти посилення підсилювачів ДА-1 та ДА-2.

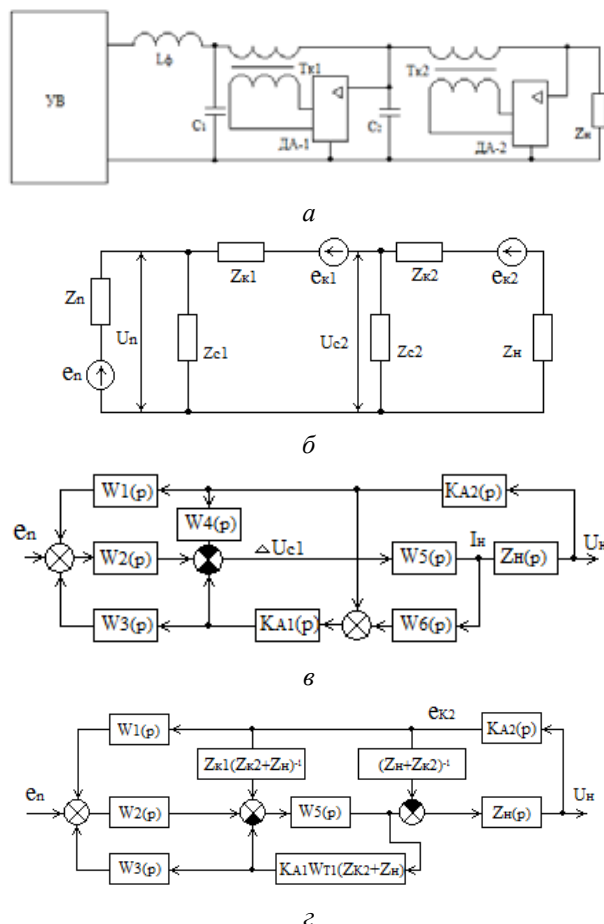


Рис. 1. Схеми фільтруючого пристрою: а – принципова схема; б – схема заміщення; в, г – структурні схеми

Структурна схема фільтра, що відповідає (1) та (2), наведена на рис. 1,в, де передавальні функції $W_1(p) - W_6(p)$ визначаються з виразів:

$$\begin{aligned}
W_1(p) &= \Im \left[Z_n Z_{C2} \left((Z_{K1} + Z_{C2}) + (Z_{K1} + Z_{C2})(Z_{K2} + Z_H) \right)^{-1} \right]; \\
W_2(p) &= \Im \left[Z_{C1} \frac{Z_{K1} Z_{C2} + (Z_{K1} + Z_{C2})(Z_{K2} + Z_H)}{Z_{\Sigma}^3} \right]; \\
W_3(p) &= \Im \left[\frac{Z_n (Z_{C2} + Z_{K2} + Z_H)}{Z_{K1} Z_{C2} + (Z_{K1} + Z_{C2})(Z_{K2} + Z_H)} \right]; \\
W_4(p) &= \Im \left(\frac{Z_{C2} + Z_{K1}}{Z_{C2}} \right); \\
W_5(p) &= \Im \left[Z_{C2} Z_{K1}^{-1} Z_{C2}^{-1} + (Z_{K1} + Z_{C2})^{-1} (Z_{K2} + Z_H)^{-1} Z_{C2} \right]; \\
W_6(p) &= \Im (Z_{K2} + Z_H).
\end{aligned}$$

Наведена структура повністю відображає взаємодію між елементами схеми, проте її аналіз та синтез викликають серйозні труднощі внаслідок необхідності багаторазового врахування всіх елементів схеми. Приводячи в ній міжланкові зв'язки до виходу U_H , та входу $\dot{e}_n$, можна знайти величину коефіцієнта фільтрації системи:

$$\begin{aligned}
q_n = \text{Mod} \left[\frac{Z_{\Sigma}^3}{Z_{C1} Z_{C2} Z_H} + \frac{Z_n + Z_{C1}}{Z_{C1}} K_{A1}(j\omega) K_{A2}(j\omega) + \right. \\
\left. + \frac{Z_n Z_{C1} + (Z_n + Z_{C1})(Z_{K1} + Z_{C1})}{Z_{C1} Z_{C2}} K_{A2}(j\omega) + \right. \\
\left. + \frac{(Z_{K2} + Z_H)(Z_n + Z_{C1})}{Z_n Z_{C1}} K_{A1}(j\omega) \right]. \quad (3)
\end{aligned}$$

З урахуванням того, що L_{21} і L_{22} мають малі величини і не істотно впливають на коефіцієнт фільтрації q_n , наближені значення складових (3) з урахуванням реальних параметрів Z_k набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}
Z_{\Sigma}^3 (Z_{C1} Z_{C2} Z_H)^{-1} &\approx 1 - L_{\phi} (C_1 + C_2) \omega_n^2; \\
(Z_n + Z_{C1}) Z_{C1}^{-1} &\approx 1 - L_{\phi} C_1 \omega_n^2; \\
[Z_n Z_{C1} + (Z_n + Z_{C1})(Z_{K1} + Z_{C2})] (Z_{C1} Z_{C2})^{-1} &= \\
= 1 - L_{\phi} (C_1 + C_2) \omega_n^2; \\
(Z_{K2} + Z_H) Z_H^{-1} &\approx 1.
\end{aligned} \quad (4)$$

Аналіз (3) та (4) показує, що при застосуванні двох АФ після пасивного фільтра забезпечується ефект перемноження коефіцієнтів фільтрації окремих ланок.

Виключивши взаємні зв'язки, структуру пристрою можна привести до вигляду, що відповідає рис. 1,з. В отриманій структурі легко виділити три ланки. Перше $W_2(p)$, що дає на виході напругу U_{C1} , являє собою пасивну частину фільтруючого пристрою, навантажену на пасивні елементи T_{K1} , T_{K2} , Z_H . Позитивні зворотні зв'язки $W_1(p)$ і $W_3(p)$ враховують ефект збільшення напруги при зниженні навантаження пасивного фільтра, що проявляється через наявність е.р.с. компенсації e_{K1} та e_{K2} .

Друга ланка являє собою перший АФ. Його передатна функція залежить як від параметрів елементів, що входять до нього, так і елементів наступного АФ, але не залежить від елементів пасивного фільтра, що свідчить про можливість розв'язки між пасивними і активними фільтрами при синтезі розглянутих пристроїв.

Третя ланка являє собою другий АФ. Його передатна функція залежить лише від своїх елементів. Позитивний зворотний зв'язок між першим та другим АФ визначає зниження коефіцієнта фільтрації першого АФ за рахунок збільшення опору його навантаження під час роботи другого АФ.

Для визначення характеру та виду зв'язків у структурі фільтруючого пристрою (рис. 1,з) звернемося до реальних параметрів схеми, не розкриваючи лише АЧХ підсилювачів компенсації $K_{A1}(j\omega)$, $K_{A2}(j\omega)$.

Для другого АФ з урахуванням значень Z_H і Z_{K2} :

$$Z_H (Z_H + Z_{K2})^{-1} \approx 1,$$

звідки випливає, що стійкість другого АФ визначається лише підсилювачем ДА-2, тому бажану ЛАЧХ і необхідні коригувальні пристрої можна забезпечити при проектуванні підсилювача.

Для оцінки стійкості та визначення задач синтезу першого АФ розглядається передатна функція:

$$W'_5(p) = W_5(p) [Z_{K2} + Z_H]. \quad (5)$$

Аналіз її у загальному вигляді важкий, а використання (5) без ряду спрощуючих передумов для синтезу пристрою практично не можливий. Тому приймемо, що $Z_{K1} = Z_{K2}$.

При виконанні умови:

$$L_2 R_H^{-1} \ll L_H / R_A^*, \quad (6)$$

вираз (5) можна перетворити до вигляду:

$$W'_5(p) = \left(1 + \frac{L_2}{R_A^*} p \right) \left(L_2 C_2 p^2 + \frac{L_2}{R_A^*} p + 1 \right). \quad (7)$$

З урахуванням того, що ємність C_2 на величину коефіцієнта фільтрації, згідно (3) і (4), значного впливу не має і не дозволяє усунути взаємний вплив між ланками фільтруючого пристрою (рис. 1,з), її можна виключити з (7). При цьому вираз (7) перетворюється на одиничну функцію, що значно спрощує синтез АФ, оскільки дозволяє оперувати лише передатними функціями підсилювача ДА-1.

Якщо частотна характеристика $W_C(p)$ розташована на вище частотної осі, e_{K2} буде додатково посилюватися і знизиться ефективність першого АФ. Тому при роботі обох АФ в одному частотному діапазоні частотна характеристика $W_C(p)$ повинна розташовуватися значно нижче частотної осі, щоб коефіцієнт підсилення по контуру $K_{A2}(p)$, $W_C(p)$, $W'_5(p)$, $Z_H(p)$, $K_{A2}(p)$ був завжди нижче одиниці.

З виразу:

$$W_c(p) = \frac{Z_{K1}(p)}{Z_{K2}(p) + Z_H(p)} = \frac{\frac{L_{22}}{R_H} p}{\frac{L_H}{R_H} \cdot \frac{L_{22}}{R_A^*} p^2 + \left(\frac{L_H}{R_H} + \frac{L_{22}}{R_A^*} + \frac{L_{22}}{R_H} \right) p + 1},$$

слідую, що цю умову можна забезпечити при виконанні (6).

Якщо виявиться, що на якійсь частоті коефіцієнт посилення по контуру розглядається близьким або більше одиниці, можуть виникнути автоколивання, що охоплюють обидва АФ. Для усунення цього небажаного явища необхідно збільшити нерівність (6) або ємність конденсатора C2.

В аналогічній формі проявляється вплив активних фільтрів на роботу пасивного, яке виражається через передатні функції $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$. Передатну функцію при $C2 = 0$ та виконання умови (6) можна подати у вигляді:

$$W_1(p) = \frac{\frac{L_\phi}{R_H} p}{\frac{L_H}{R_H} \cdot \frac{L_{22}}{R_A^*} p^2 + \left(\frac{L_{22}}{R_H} + \frac{L_H}{R_H} + \frac{L_{22}}{R_A^*} \right) p + 1}. \quad (8)$$

Передатна функція $W_2(p)$ за тих же умов набуде наступного вигляду:

$$W_2(p) = \frac{\frac{2L_{22} + L_H}{R_H} p + 1}{(L_\phi C_1 p^2 + 1) \left(\frac{L_{22} + L_H}{R_H} p + 1 \right)} \approx \frac{1}{L_\phi C_1 p^2 + 1}. \quad (9)$$

Відсутність коефіцієнта демпфування (9) зумовлено тим, що при аналізі не враховано активний опір дроселя L_ϕ .

Передатна функція $W_3(p)$ визначається формулою, аналогічною (8).

Наявність конденсатора C2 приводить у формулах (8) і (9) до підвищення на два порядки чисельника та знаменника одночасно і не дає жодних переваг підвищення ефективності всього пристрою. Існування ланок з передавальними функціями $W_1(p)$ і $W_3(p)$ призводить до додаткової можливості виникнення автоколивань, що охоплюють пасивний і перший активний фільтри або всі три одночасно. Необхідна умова їх відсутності – коефіцієнт посилення за заданими контурами – повинен бути меншим за одиницю [4]. Забезпечити його доцільно збільшенням ємності C1 та індуктивності навантаження L_H , а вихідні

каскади підсилювачів бажано обирати так, щоб опори R_A^* були мінімальними. Виникнення автоколивань по одному з можливих контурів призводить до відмови всієї системи, оскільки зазвичай вони не входять у смугу компенсації АФ і тому виводять з режиму підсилювач, який не бере участі в автоколиваннях фільтра, що впливає на якість його роботи.

При виконання всіх зазначених вимог структура наводиться до одиничного зворотного зв'язку і додатково перевіряється на стійкість.

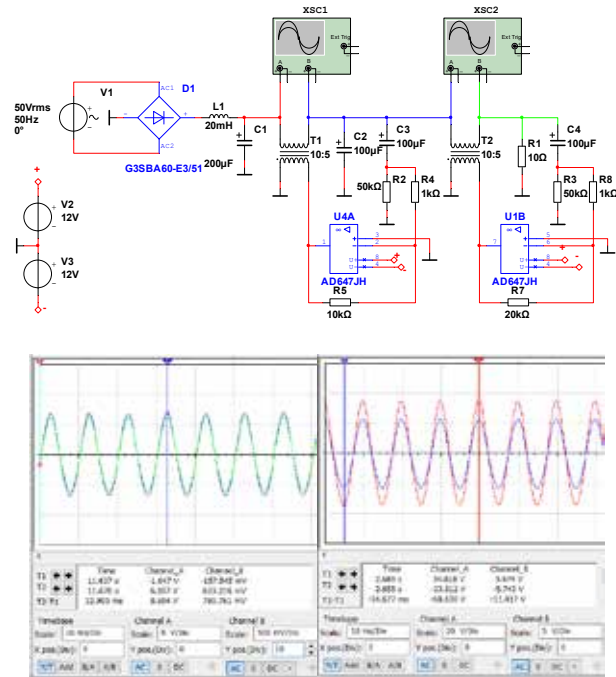


Рис. 2. Моделювання роботи фільтруючого пристрою

ВИСНОВКИ

1. По аналогії з каскадним включенням пасивних фільтрів між активними фільтрами існує взаємний вплив між каскадами. Але, в той час як взаємний вплив пасивних фільтрів приводить лише до незначного зниження загального коефіцієнта фільтрації порівняно з розрахунковими значеннями і зменшення частоти ефективної фільтрації в активних фільтрах взаємний вплив може приводити до зниження стійкості кожного з них і до можливої появи автоколивань як кожного фільтра окремо, так і всього фільтруючого пристрою в цілому.

2. Розроблені рекомендації по вибору параметрів елементів кожного з фільтрів дозволяють усунути причини можливого виникнення автоколивань і забезпечити високу ефективність фільтруючого пристрою в цілому.

REFERENCES

- [1] Analog Devices. (n.d.). *MicroConverter®, dual-channel 16-bit ADCs with embedded flash MCU ADuC816/810 – Datasheet*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.analog.com/en/products/aduc816.html>
- [2] Analog Devices. (n.d.). *Precision voltage regulator controller ADP3310 – Datasheet*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf>
- [3] Vlemincq, L. (n.d.). *Smart ripple canceller offers near-zero dropout*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.radiolocman.com/shem/schematics.html?di=655183>
- [4] Sokol, Ye. I., Honcharov, Yu. P., Zamaruev, V. V., Kryvosheiev, S. Yu., Liubych, R. I., & Chursina, Yu. V. (2008). Low-frequency self-oscillations in power active filters [Nyzkochastotni avtokolivannya v sylovykh aktyvnykh filtrakh]. *Technical Electrodynamics. Problems of Modern Electrical Engineering*, (3), 81–87. [in Ukrainian]
- [5] Honcharov, Yu. P., & Nikitin, A. V. (1997). Single-quadrant active filters for semiconductor converters with low power dissipation [Oдно kvadrantni aktyvni filtry dlya napivprovodnykovykh pereboruchiv z maloyu potuzhnistyu rozsishannya]. *Visnyk KhDTU*, (8), 155–158. [in Ukrainian]
- [6] Semenenko, Yu. O. (2016). Stabilization and active filtering of rectified voltage in a closed-loop system [Stabilizatsiya i aktyvnaya fil'tratsiya vypryamnennogo napryazheniya v zamkhnutoy strukture]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (166). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92884> [in Ukrainian]
- [7] Jing, H., et al. (2011, April 16–18). Design and realization of high-precision digital control direct current power supply. *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Xianning, China. <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768894>
- [8] Huang, H., et al. (2021). Design of high precision and high power bidirectional adjustable power supply. *Fusion Engineering and Design*, 162, 112103. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112103>
- [9] Hegarty, T. (n.d.). *An overview of conducted EMI specifications for power supplies*. Texas Instruments. Retrieved May 9, 2025, from <https://www.ti.com/lit/wp/slyy136/slyy136.pdf>
- [10] Yang, W., Huang, J., & Dai, Z. (2020, June 12–14). Design of a high-precision DC regulated power supply system. *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chongqing, China. <https://doi.org/10.1109/itnec48623.2020.9084831>
- [11] Li, G., et al. (2001). Common-mode noise reduction in DC-DC converters by common-source type active-clamp technique. *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1109/pesc.2001.954379>
- [12] (Author(s) not specified). (2023). DC power supply with parallel active compensation function and tuneable inductive filter based on analogue control: Part 1. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148839>
- [13] Onishi, H., Nagaoka, S., & Zaitse, T. (n.d.). Noise cancellation for miniaturization of switched mode power supply. *OMRON TECHNICS*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.omron.com/global/en/assets/file/technology/omrontechnics/vol52/OMT_Vol52_003EN.pdf
- [14] Murray, O. (n.d.). *How to reduce EMI and shrink power-supply size with an integrated active EMI filter*. Texas Instruments. Retrieved May 12, 2025, from <https://www.ti.com/lit/ta/sszt179/sszt179.pdf>
- [15] Understanding DC filters: Types, applications & benefits. (n.d.). *Anypcba.com*. Retrieved May 12, 2025, from <https://www.anypcba.com/blogs/electronic-component-knowledge/understanding-dc-filters-types-applications-benefits.html>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Analog Devices. (n.d.). *MicroConverter®, dual-channel 16-bit ADCs with embedded flash MCU ADuC816/810 – Datasheet*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.analog.com/en/products/aduc816.html>
- [2] Analog Devices. (n.d.). *Precision voltage regulator controller ADP3310 – Datasheet*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf>
- [3] Vlemincq, L. (n.d.). *Smart ripple canceller offers near-zero dropout*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.radiolocman.com/shem/schematics.html?di=655183>
- [4] Сокол, Є. І., Гончаров, Ю. П., Замаруєв, В. В., Кривошеєв, С. Ю., Любич, Р. І., & Чурсіна, Ю. В. (2008). Низькочастотні автоколивання в силових активних фільтрах. *Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки*, (3), 81–87.
- [5] Гончаров, Ю. П., & Нікітін, А. В. (1997). Одно квадрантні активні фільтри для напівпровідникових перетворювачів з малою потужністю розсіювання. *Вісник ХДТУ*, (8), 155–158.
- [6] Семененко, Ю. О. (2016). Стабілізація і активна фільтрація випрямленого напруги в замкнутій структурі. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (166). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92884>
- [7] Jing, H., et al. (2011, April 16–18). Design and realization of high-precision digital control direct current power supply. *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Xianning, China. <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768894>
- [8] Huang, H., et al. (2021). Design of high precision and high power bidirectional adjustable power supply. *Fusion Engineering and Design*, 162, 112103. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112103>

- [9] Hegarty, T. (n.d.). An overview of conducted EMI specifications for power supplies. Texas Instruments. Retrieved May 9, 2025, from <https://www.ti.com/lit/wp/slyy136/slyy136.pdf>
- [10] Yang, W., Huang, J., & Dai, Z. (2020, June 12–14). Design of a high-precision DC regulated power supply system. *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chongqing, China. <https://doi.org/10.1109/itnec48623.2020.9084831>
- [11] Li, G., et al. (2001). Common-mode noise reduction in DC-DC converters by common-source type active-clamp technique. *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1109/pesc.2001.954379>
- [12] (Автор(и) не вказані). (2023). DC power supply with parallel active compensation function and tuneable inductive filter based on analogue control: Part 1. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148839>
- [13] Onishi, H., Nagaoka, S., & Zaitse, T. (n.d.). Noise cancellation for miniaturization of switched mode power supply. *OMRON TECHNICS*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.omron.com/global/en/assets/file/technology/omrontechnics/vol52/OMT_Vol52_003EN.pdf
- [14] Murray, O. (n.d.). How to reduce EMI and shrink power-supply size with an integrated active EMI filter. Texas Instruments. Retrieved May 12, 2025, from <https://www.ti.com/lit/ta/sszt179/sszt179.pdf>
- [15] Understanding DC filters: Types, applications & benefits. (n.d.). *Anypcba.com*. Retrieved May 12, 2025, from <https://www.anypcba.com/blogs/electronic-component-knowledge/understanding-dc-filters-types-applications-benefits.html>

© Рябенський В. М., Трибулькевич С. Л., Худякова І. М., Кудрявцев О. С.
Дата надходження статті до редакції: 01.05.2025
Дата затвердження статті до друку: 15.05.2025