

ЛЕБЕДЬ ДЕНИС ЮРІЙОВИЧ ✉ – доктор філософії (PhD), асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9741>; e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com.

ВОЙТЮК ЮРІЙ ПЕТРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1896-5927>; e-mail: voytyuk77@gmail.com.

ШУЛЛЕ ЮЛІЯ АНДРІЙВНА – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5516-7543>; e-mail: shullye.y.a@vntu.edu.ua.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ LC-ФІЛЬТРА НА РОБОТУ UPQC-VAMIN ПРИ ЗМІНІ НАПРУГИ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Стаття присвячена оцінці впливу параметрів вихідного LC-фільтра нижніх частот послідовного силового активного фільтра на перетік активної потужності та показники гармонічного спотворення струму та напруги в системі уніфікованого регулятора якості електроенергії з мінімальною встановленою потужністю (UPQC-VAMin). Дослідження LC-фільтра виконувалося на базі моделювання в середовищі Matlab/Simulink для трифазної чотирипровідної системи, що функціонує з нелінійним навантаженням. Об'єктом аналізу є встановлення взаємозв'язку між вихідною індуктивністю, змінною напругою джерела живлення у діапазоні (від 340 до 440 В) та ключовими показниками: активною потужністю UPQC-VAMin, коефіцієнтами гармонічних спотворень струму мережі, напруг на навантаженні та мережі. Досліджено дві поширені конфігурації LC-фільтра: за умови фіксованої ємності 100 мкФ зі змінною індуктивністю уперед заданому діапазоні від 0,1 до 3,1 мГн та за умови стабілізації резонансної частоти у межах мінімальних показників індуктивності та ємності LC-фільтра. Дослідження проведено для розрахункових вузлів схеми живлення, обраних у межах напруги, що змінюється в діапазоні від -15% до $+10\%$ з кроком 10 В та індуктивності L-фільтра 0,1–3,1 мГн з кроком 0,2 мГн, що дозволило побудувати прецизійні поверхні відгуку та встановити динаміку перебігу електромагнітних процесів. Проаналізовано характерні залежності перетоку активної потужності в UPQC-VAMin від вхідної напруги. Доведено, що неконтрольоване зростання індуктивності понад 2 мГн при сталій ємності призводить до виникнення резонансних явищ, які підвищують рівень гармонічного спотворення струму мережі до 5,5 %. Визначено зони мінімальних спотворень напруги на навантаженні, що підтверджує надійність обраної системи керування. За принципом оптимальності по Парето отримані результати демонструють забезпечення мінімізації коефіцієнтів гармонічних спотворень струму та напруги.

Ключові слова: уніфікований регулятор якості електроенергії з мінімальною встановленою потужністю (UPQC-VAMin); послідовний силовий активний фільтр; паралельний силовий активний фільтр; LC-фільтр; коефіцієнт гармонічних спотворень; якість електроенергії.

Вступ і постановка задачі. Для підвищення окремих показників якості електроенергії у деяких випадках рекомендують використовувати послідовні та паралельні силові активні фільтри (САФ), інтеграція функціональних можливостей яких дозволила реалізувати уніфіковані регулятори якості електроенергії (UPQC) [1–3]. У сучасних дослідженнях особливу увагу приділено вдосконаленню систем керування UPQC за допомогою штучного інтелекту та гібридних нейронних мереж: Nishad та інші в [4] запропонували заснований на штучному інтелекті контроль для оптимізації якості електроенергії в системах залізничного транспорту, Goud et al. [5] розробили контролер на базі керування рекурентних одиниць (Gated Recurrent Unit, GRU) для компенсації гармонік, провалів та перенапруг у мережах з нелінійним навантаженням, а S. Das [6] емпірично проаналізували гібридні алгоритми керування на базі адаптивних нейро-нечітких систем виведення (adaptive neuro-fuzzy inference system. ANFIS) та штучних нейронних систем (artificial neural network, ANN) послідовним і паралельним САФ, що забезпечують зниження коефіцієнта нелінійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) напруги навантаження до

4,26 % та струму мережі до 0,08 %. Аналогічні підходи з використанням ANN-контролерів для фотоелектричних (photovoltaic, PV) систем розглянуто Ibrahim в [7], а Li в [8] продемонстрував підвищення надійності електропостачання в низьковольтних розподільних мережах за рахунок UPQC.

Ключовим конструктивним параметром послідовного САФ є вихідна індуктивність послідовного ланцюга (L_{se}), яка визначає динаміку регулювання, рівень пульсацій струму та резонансні характеристики LC-фільтра. Попри значний обсяг публікацій, присвячених методам керування [4–7], моделюванню малих сигналів [9] та аналізу стійкості мікромереж [1, 2], поза увагою дослідників залишається питання системного аналізу впливу L_{se} на перетік активної потужності та показники якості електроенергії $THDi$, $THDu$ в умовах значних відхилень напруги джерела живлення U_s (340–440 В). S. Das [6] провів емпіричний аналіз гібридних контролерів щодо коефіцієнта гармонічних спотворень THD, провалів та перенапруг, проте без урахування зміни індуктивності фільтра. S. Shi та інші в [9] виконали моделювання малих сигналів UPQC у dq -системі координат, однак не розглянули вплив L_{se} на

© Д. Ю. Лебедь, Ю. П. Войтюк, Ю. А. Шулле, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

енергетичні потоки. В [3] системно оцінені гібридні AC/DC мікромережі з UPQC, а Taghvaie в [2] надали огляд методів компенсації гармонік, проте обидві роботи не торкалися параметричного впливу LC-фільтра на Парето-оптимізацію гармонічних спотворень. Проблематика одночасного впливу L_{se} та U_s на весь спектр показників якості електроенергії в UPQC- V_{Amin} залишається маловивченою [10, 11].

Метою статті є обґрунтування по Парето оптимальних параметрів LC-фільтра, що дозволяє провести комплексний аналіз та встановити залежності енергетичних показників (потужність послідовного (P_{se}) і паралельного (P_{sh}) САФ) та параметрів ТНД струму та напруги для системи з UPQC- V_{Amin} .

Основний матеріал дослідження. Для дослідження вихідного LC-фільтра моделювання роботи системи з UPQC- V_{Amin} та нелінійним навантаженням (рис. 1) реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink, що дозволяє з високою точністю відтворити перехідні та усталені режими роботи.

Прийнято, що опір лінії живлення становить $0,0034+j0,0135$ Ом. Зі сторони мережі приєднано паралельний САФ. Послідовний САФ з'єднується з електричною мережею через силовий трансформатор потужністю 100 кВА, до виходу якого через кабельну лінію, з опором $0,0206+j0,01$ Ом, приєднуються лінійний ($4+j3,14$ Ом) та нелінійний (трифазний 6-пульсний некерований випрямляч з опором 4 Ом) споживачі. Обидва перетворювачі забезпечують перетік потужності через спільну DC-шину (два послідовно з'єднані конденсатори $C_{dc} = 3300$ мкФ кожен, $U_{dcref} = 770$ В). Розраховані параметри навантаження наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри навантаження

Стала величина	Параметр	Значення
Активна потужність навантаження	P_L	96,8 кВт
Реактивна потужність навантаження	Q_L	23,8 кВАр
Струм навантаження	I_L	143,089 А
Опір навантаження	Z_L	$1,882+j0,455$ Ом

Для аналізу UPQC- V_{Amin} при зміні напруги живлення було визначено базову конфігурацію силової частини пристрою. Технічні характеристики та параметри елементів моделі наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри силової частини UPQC- V_{Amin}

Елемент	Параметр	Значення
Паралельний САФ	L_{sh} / C_{sh}	0,6 мГн / 15 мкФ
Послідовний САФ	L_{se} / C_{se}	0,1..3 мГн / 100 мкФ
Трансформатор T_{se}	S_T / k	100 кВА / 1:1
Конденсатори DC-шини	C_{dc}	$C_{dc} = 1650$ мкФ

Для дослідження було розглянуто дві умови роботи вихідного LC-фільтр (рис. 2). Крива 1 з постійною ємністю демонструє різке падіння частоти з 1600 Гц до позначки нижче 300 Гц при зростанні індуктивності. Натомість режим адаптивного керування, що демонструє крива 2, підтримує стабільну частоту в межах 1520–1630 Гц завдяки точному підбору ємності C_{se} .

Зміна напруги мережі U_s від 340 В до 440 В відповідає відхиленню від номінальної напруги -15% до $+10\%$ відповідно. Обраний крок зміни для параметрів: $\Delta L_{se} = 0,2$ мГн, $\Delta U_s = 10$ В.

На рис. 3 наведено тривимірні поверхні залежності активної потужності послідовного P_{se} та паралельного P_{sh} САФ від індуктивності L_{se} та напруги мережі U_s .

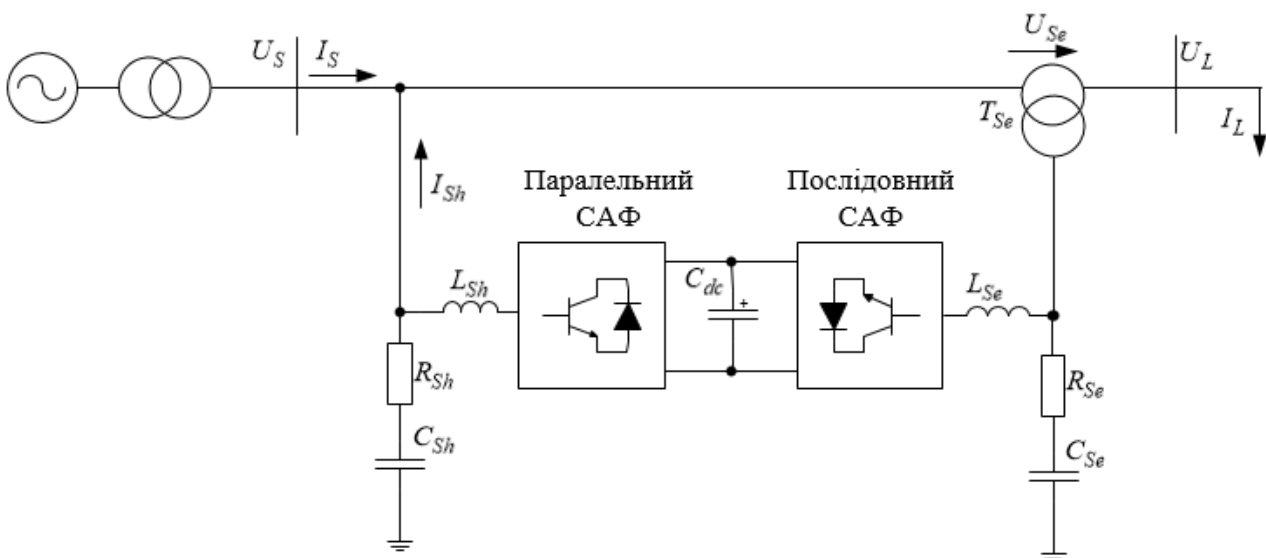


Рисунок 1 – Структурна схема паралельно-послідовного UPQC

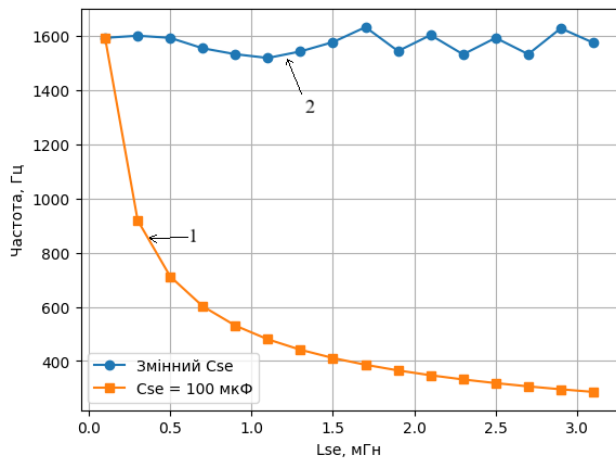
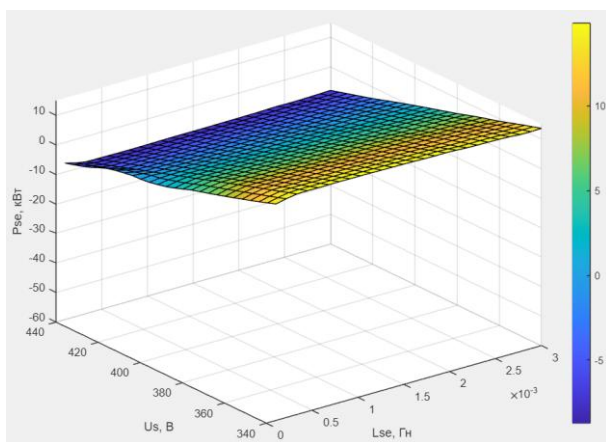
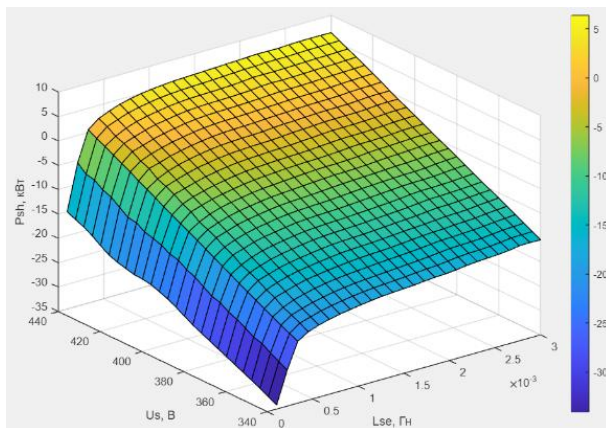


Рисунок 2 – Залежність резонансної частоти LC-фільтра від зміни індуктивності L_{se} та ємності C_{se}



a



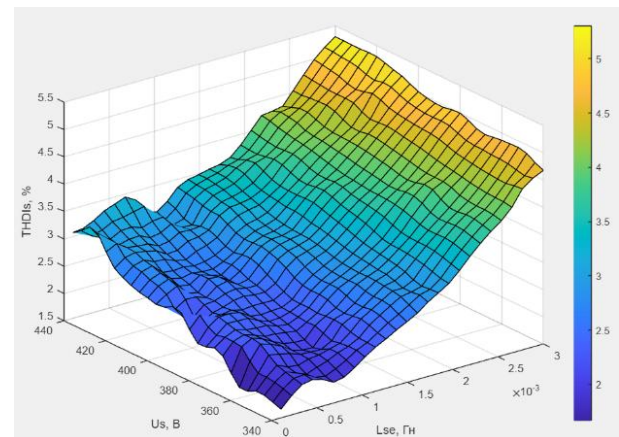
б

Рисунок 3 – Поверхня:
a – $P_{se}(U_s, L_{se})$; *б* – $P_{sh}(U_s, L_{se})$

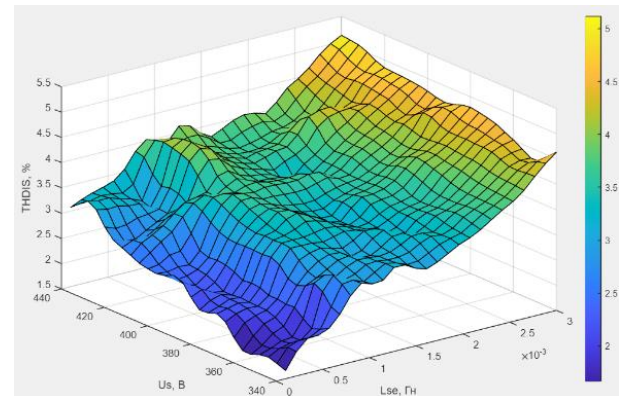
Аналіз результатів на рис. 3 показав, що в обох умовах поверхня активної потужності послідовного P_{se} та паралельного P_{sh} САФ демонструє виражену лінійну залежність від напруги мережі U_s та слабку – від індуктивності L_{se} . У зоні $L_{se} < 0,5$ мГн та $U_s \approx 340\text{--}360$ В активна потужність паралельного САФ P_{sh} набуває найбільших від'ємних значень (до -25 кВт),

що відповідає режиму інтенсивного поглинання енергії при компенсації провалу напруги. Зі збільшенням індуктивності L_{se} від $0,5$ до $3,1$ мГн поверхня активної потужності P_{se} послідовного САФ монотонно зміщується до нуля: при напрузі мережі $U_s \approx 400$ В та $L_{se} \approx 1,5\text{--}2,5$ мГн значення P_{se} не перевищує ± 2 кВт, що відповідає умові мінімального перетоку потужності в $UPQC-V_{Amin}$.

На рис. 4 показано залежність коефіцієнта гармонічних спотворень струму мережі THD_{Is} від параметрів індуктивності L_{se} та напруги мережі U_s для обох умов.



a



б

Рисунок 4 – Поверхня $THD_{Is}(U_s, L_{se})$:
a – $C_{se} = const = 100$ мкФ; *б* – $f_{se} = const = 1591$ Гц

Аналіз результатів (рис. 4 *a*) свідчить, що за індуктивності $L_{se} \approx 2,5\text{--}3,1$ мГн формується резонансний пік, оскільки цей діапазон параметрів збігається з максимумом амплітудно-частотної характеристики LC-фільтра (7 дБ, див. рис. 5) на частотах 5-ї та 7-ї гармонік, що призводить до їхнього підсилення. Поверхня THD_{Is} є монотонно зростаючою при збільшенні індуктивності L_{se} у всьому діапазоні зміни параметрів.

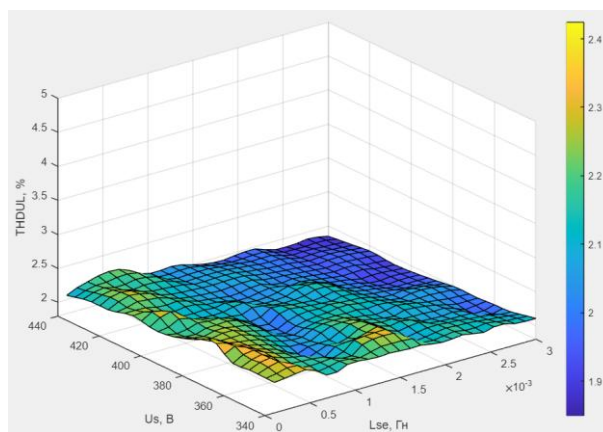
Аналіз результатів на рис. 4 *б* показав, що коефіцієнт гармонічних спотворень струму мережі THD_{Is} має виражений резонансний максимум у зоні індуктивності $L_{se} \approx 0,8\text{--}3,1$ мГн на всьому діапазоні

зміни напруги мережі U_s . Цей максимум зумовлений тим, що при зростанні індуктивності L_{se} резонансна частота LC -фільтра залишається сталою (від 1591 Гц), а послідовний САФ з однополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (SPWM) при частоті комутації послідовного САФ $f_{sw} = 2500$ Гц формує у вихідній напрузі інвертора першу домінуючу групу гармонік не на базовій, а на подвоєній частоті комутації $2 \cdot f_{sw} = 5000$ Гц. В результаті чого коефіцієнт згасання LC -фільтра на частоті 5 кГц становить -20 дБ (див. рис. 5), що недостатньо для зниження пульсацій генерованої напруги послідовного САФ U_{se} .

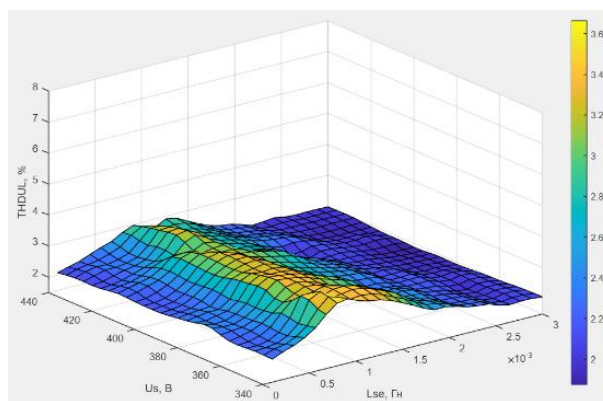
Поза резонансною зоною коефіцієнт гармонічних спотворень струму мережі THD_{Is} знижується до $1,5-2,5$ %. Вплив зміни напруги мережі U_s в обох умовах не перевищує $0,5$ %, що підтверджує домінуючий вплив параметрів фільтра.

На рис. 6 наведено залежність коефіцієнта гармонічних спотворень напруги навантаження THD_{UL} від індуктивності L_{se} та напруги мережі U_s .

В обох умовах (рис. 6) коефіцієнт гармонічних спотворень напруги навантаження THD_{UL} є найбільш рівномірною серед усіх розглянутих показників: значення змінюється у вузькому діапазоні $1,9-3,6$ %. Це свідчить про ефективну роботу послідовного САФ у підтриманні якості напруги на навантаженні незалежно від параметрів послідовного САФ.



а



б

Рисунок 6 – Поверхня $THD_{UL}(U_s, L_{se})$:
а – $C_{se} = const = 100$ мкФ; б – $f_{se} = const = 1591$ Гц

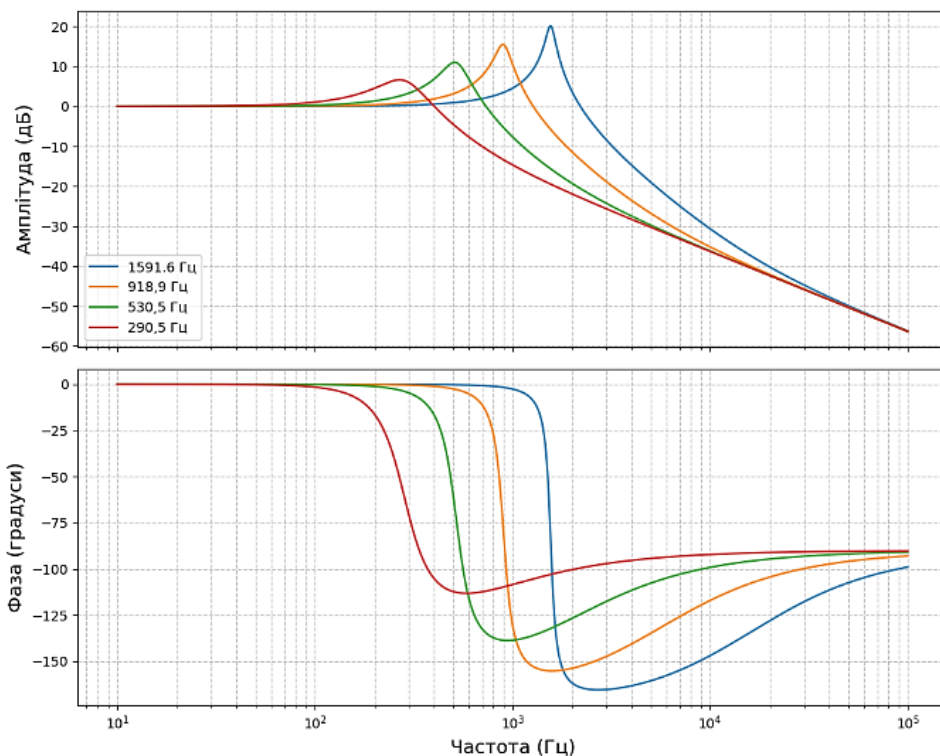


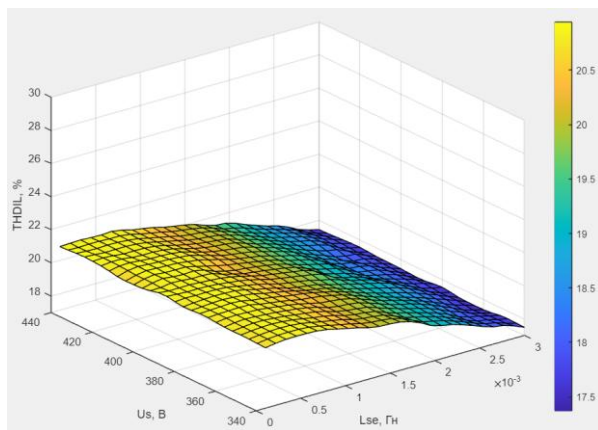
Рисунок 5 – Діаграма Бode за резонансних частот LC -фільтра

За умови на рис. 6 а присутній локальний максимум ($\sim 2,2\%$) у резонансній зоні за індуктивності $L_{se} \approx 0,1-0,5$ мГн, де LC -фільтр має найменший вплив на зниження пульсацій вихідної напруги, при зміні напруги мережі U_s від 340 до 380 В.

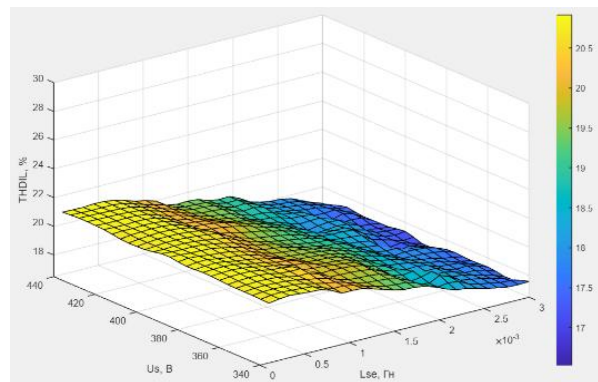
За умови рис. 6 б локальний максимум ($\sim 3,4\%$) присутній у резонансній зоні індуктивності $L_{se} \approx 0,6-1,2$ мГн, по всьому діапазону зміни напруги мережі, що корелює з максимумом THD_{IS} (див. рис. 4 б) і підтверджує резонансний пік на частоті 1591 Гц.

Слабка чутливість ($< 0,3\%$) до зміни напруги мережі U_s в обох умовах підтверджує, що індуктивність L_{se} не є критичним параметром для забезпечення якості напруги навантаження.

На рис. 7 зображено залежність коефіцієнта гармонічних спотворень струму навантаження THD_{IL} від індуктивності L_{se} та напруги мережі U_s .



а



б

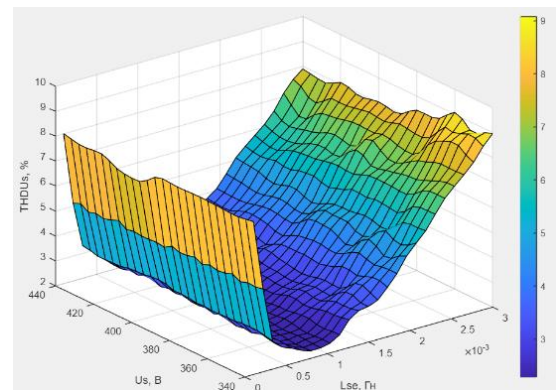
Рисунок 7 – Поверхня $THD_{IL}(U_s, L_{se})$:

а – $C_{se} = const = 100$ мкФ; б – $f_{se} = const = 1591$ Гц

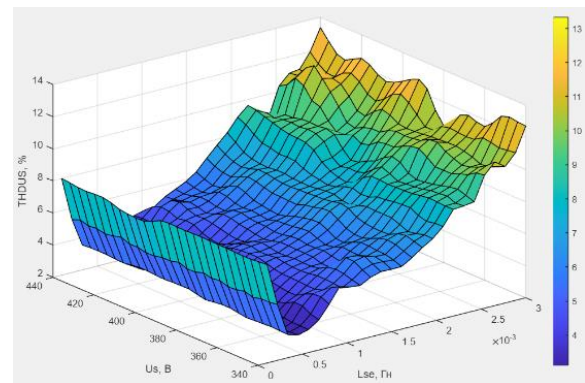
В обох умовах (рис. 7) коефіцієнт гармонічних спотворень струму навантаження THD_{IL} демонструє монотонну спадну тенденцію: зі збільшенням індуктивності L_{se} від 0,1 до 3 мГн значення THD_{IL} знижується від $\approx 21\%$ до $\approx 17\%$ у всьому діапазоні зміни напруги мережі U_s . У діапазоні індуктивності $L_{se} = 2-3$ мГн послідовний САФ формує режим, у якому напруга на навантаженні знижується з 400 В до приблизно 380 В. Це означає, що в даному інтервалі

індуктивності система переходить у режим заниженого регулювання напруги.

На рис. 8 представлено залежність коефіцієнта гармонічних спотворень напруги мережі THD_{US} від індуктивності L_{se} та напруги мережі U_s .



а



б

Рисунок 8 – Поверхня $THD_{US}(U_s, L_{se})$:

а – $C_{se} = const = 100$ мкФ; б – $f_{se} = const = 1591$ Гц

Аналіз результатів на рис. 8 а показав, що коефіцієнт гармонічних спотворень напруги мережі THD_{US} має двозонний характер з глибоким мінімумом ($\sim 2-3\%$) в зоні індуктивності $L_{se} \approx 0,8-1,2$ мГн та різким зростанням у обидва боки: при $L_{se} \rightarrow 0$ THD_{US} досягає 7–8% (відсутність індуктивного згладжування пульсацій напруги), при індуктивності $L_{se} > 2$ мГн – зростає до 10–13% (резонансне підсилення на нижніх частотах фільтра).

На рис. 8 б мінімальна зона коефіцієнта гармонічних спотворень напруги мережі THD_{US} звужується: оскільки LC -фільтр проходить через резонансний пік 1591 Гц, зменшення ємності C_{se} при зростанні індуктивності L_{se} призводить до резонансного підсилення у смузі гармонік.

Результати аналізу свідчать, що в обох досліджених режимах область мінімуму коефіцієнта гармонічних спотворень напруги мережі THD_{US} (при $L_{se} \approx 0,6-1,2$ мГн) збігається з резонансною зоною мінімуму коефіцієнта гармонічних спотворень напруги навантаження THD_{UL} лише за умов, наведених на рис. 6 б. Така залежність зумовлює суперечність при виборі

індуктивності L_{se} , оскільки значення, оптимальні за критерієм THD_{US} , є неоптимальними для мінімізації THD_{UL} .

Висновки. По результатам роботи встановлено, що збільшення вихідної індуктивності L_{se} послідовного САФ у діапазоні 0,1–3,1 мГн зумовлює монотонне зниження перетоку активної потужності P_{se} та P_{sh} . Експериментально підтверджено реалізацію режиму мінімального енергетичного навантаження системи $UPQC-V_{Amin}$: при напрузі живлення $U_s = 400$ В у діапазоні $L_{se} = 1,5–2,5$ мГн модулі потужностей P_{se} та P_{sh} не перевищують 2 кВт.

Виявлено, що за умови підтримання сталої резонансної частоти f_{se} резонансний максимум нівелюється, проте коефіцієнт спотворення струму мережі THD_{IS} залишається стабільно високим ($> 4\%$). Водночас за фіксованої ємності $C_{se} = 100$ мкФ у діапазоні $L_{se} = 2–3$ мГн виникає резонансне зростання THD_{IS} до рівня 5,5%.

Обґрунтовано стабільність роботи послідовного САФ щодо забезпечення якості напруги на навантаженні, а показник THD_{UL} утримується в межах 1,9–3,6% завдяки раціональному поєднанню параметрів L_{se} та U_s .

У діапазоні $L_{se} \approx 0,8–1,2$ мГн виявлено двозонний характер залежності коефіцієнта гармонічних спотворення напруги мережі THD_{US} з локальним мінімумом. Подальше зростання індуктивності за межі цієї області призводить до спотворення спектрального складу напруги мережі, що вказує на наявність параметричного компромісу між мінімізацією THD_{US} та THD_{UL} .

Запропоновано для мереж із нелінійним навантаженням використовувати оптимальний по Парето діапазон індуктивності $L_{se} = 0,6–0,8$ мГн. Вибір параметрів у цій області забезпечує узгоджене зниження значень THD_{IS} , THD_{IL} , THD_{UL} та THD_{US} без виникнення виражених резонансних явищ за умови, що частота зрізу LC-фільтра не перевищує 1 кГц.

Список літератури

1. An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for distribution networks with the presence of distributed generation resources (DGs) / D. Razmi et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 10308–10325. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3238685>.
2. A comprehensive review of harmonic issues and estimation techniques in power system networks based on traditional and artificial intelligence/machine learning / A. Taghvaie et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 31417–31442. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3260768>.
3. Hybrid AC/DC microgrid: systematic evaluation of interlinking converters, control strategies, and protection schemes: a review / M. Y. A. Khan et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 160097–160132. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3485001>.
4. AI based UPQC control technique for power quality optimization of railway transportation systems / D. K. Nishad et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 17935. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68575-5>.
5. GRU controller-based UPQC compensator design for improving power quality in grid-integrated non-linear load system / B. S. Goud et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 19677. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04833-4>.

6. Empirical analysis of power quality using UPQC with hybrid control techniques / S. Das et al. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. 101527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101527>.
7. Operation of grid-connected PV system with ANN-based MPPT and an optimized LCL filter using GRG algorithm for enhanced power quality / N. F. Ibrahim et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 106859–106876. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3317980>.
8. Power supply reliability enhancement for low-voltage distribution area with power quality improvement function / H. Li et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 130619–130631. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3229424>.
9. Shi S., Liu D., Han J. Small signal modeling and performance analysis of conventional- and dual-UPQC. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 11909–11925. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3355590>.
10. Qasim A., Tahir F., Alsammak A. Voltage sag, voltage swell and harmonics reduction using unified power quality conditioner (UPQC) under nonlinear loads. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*. 2021. Vol. 17, no. 2. P. 140–150. DOI: <https://doi.org/10.37917/ijeee.17.2.16>.
11. Espinosa Gutiérrez J. S., Aguila Téllez A. Optimal placement of a unified power quality conditioner (UPQC) in distribution systems using exhaustive search to improve voltage profiles and harmonic distortion. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 17. 4499. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174499>.

References

1. D. Razmi, T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi, and M. Ghadamyari, "An overview on power quality issues and control strategies for distribution networks with the presence of distributed generation resources (DGs)," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 10308–10325, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3238685>
2. A. Taghvaie, T. Warnakulasuriya, D. Kumar, F. Zare, R. Sharma, and M. Vilathgamuwa, "A comprehensive review of harmonic issues and estimation techniques in power system networks based on traditional and artificial intelligence/machine learning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31417–31442, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3260768>
3. M. Y. A. Khan, H. Liu, Y. Zhang, and J. Wang, "Hybrid AC/DC microgrid: systematic evaluation of interlinking converters, control strategies, and protection schemes: a review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 160097–160132, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3485001>
4. D. K. Nishad, A. N. Tiwari, S. Khalid, S. Gupta, and A. Shukla, "AI based UPQC control technique for power quality optimization of railway transportation systems," *Scientific Reports*, vol. 14, Aug. 2024, Art. no. 17935, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68575-5>
5. B. S. Goud et al., "GRU controller-based UPQC compensator design for improving power quality in grid-integrated non-linear load system," *Scientific Reports*, vol. 15, Jun. 2025, Art. no. 19677, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04833-4>
6. S. Das, H. M. Ishrak, M. M. Hasan, and M. A. Kabir, "Empirical analysis of power quality using UPQC with hybrid control techniques," *Results in Engineering*, vol. 20, Dec. 2023, Art. no. 101527, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101527>
7. N. F. Ibrahim et al., "Operation of grid-connected PV system with ANN-based MPPT and an optimized LCL filter using GRG algorithm for enhanced power quality," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 106859–106876, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3317980>
8. H. Li et al., "Power supply reliability enhancement for low-voltage distribution area with power quality improvement function," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130619–130631, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3229424>
9. S. Shi, D. Liu, and J. Han, "Small signal modeling and performance analysis of conventional- and dual-UPQC," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 11909–11925, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3355590>
10. A. Qasim, F. Tahir, and A. Alsammak, "Voltage sag, voltage swell and harmonics reduction using unified power quality conditioner (UPQC) under nonlinear loads," *Iraqi Journal for Electrical and*

Electronic Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 140–150, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.37917/jjee.17.2.16>

Надійшла (Received) 16.04.2026

11. J. S. Espinosa Gutiérrez and A. Aguila Téllez, “Optimal placement of a unified power quality conditioner (UPQC) in distribution systems using exhaustive search to improve voltage profiles and harmonic distortion,” *Energies*, vol. 18, no. 17, Aug. 2025, Art. no. 4499, doi: <https://doi.org/10.3390/en18174499>

Прийнята (Accepted) 05.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.316.772.1

LEBED DENYS ✉ – Doctor of Philosophy (PhD), Teaching Fellow of the Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9741>; e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com.

VOITYUK YURIY – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1896-5927>; e-mail: voityuk77@gmail.com.

SHULLIE IULLIA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University; Vinnytsia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5516-7543>; e-mail: shullye.y.a@vntu.edu.ua.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF LC-FILTER ON UPQC-VAMIN OPERATION WHEN CHANGING THE POWER SOURCE VOLTAGE

The article is devoted to the assessment of the influence of the parameters of the output LC low-pass filter of a series power active filter on the flow of active power and the indicators of harmonic distortion of current and voltage in the system of a unified power quality regulator with a minimum installed power (UPQC-V_{Amin}). The study of the LC filter was performed on the basis of modeling in the Matlab/Simulink environment for a three-phase four-wire system operating with a nonlinear load. The object of the analysis is to establish the relationship between the output inductance, the alternating voltage of the power source in the range (from 340 to 440 V) and key indicators: active power UPQC-V_{Amin}, the harmonic distortion coefficients of the network current, voltages on the load and the network. Two common LC filter configurations were investigated: with a fixed capacitance of 100 μF with a variable inductance in a predetermined range from 0.1 to 3.1 mH and with stabilization of the resonant frequency within the minimum inductance and capacitance of the LC filter. The study was conducted for the calculated power supply circuit nodes selected within the voltage range varying in the range from –15 % to +10 % with a step of 10 V and an L-filter inductance of 0.1–3.1 mH with a step of 0.2 mH, which allowed constructing precision response surfaces and establishing the dynamics of the course of electromagnetic processes. The characteristic dependences of the active power flow in UPQC-V_{Amin} on the input voltage were analyzed. It is proved that uncontrolled growth of inductance over 2 mH at constant capacitance leads to the emergence of resonance phenomena, which increase the level of harmonic distortion of the network current to 5.5 %. Zones of minimal voltage distortions on the load are determined, which confirms the reliability of the selected control system. According to the principle of Pareto optimality, the obtained results demonstrate the minimization of the coefficients of harmonic distortion of current and voltage.

Keywords: unified power quality regulator with a minimum installed power (UPQC-V_{Amin}); series power active filter; parallel power active filter; LC filter; harmonic distortion coefficient; power quality.