

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, Д. Ю. Лебедь

**КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ
ЗА НАЯВНОСТІ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ В
РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2026

УДК 621.316.1

Б91

Рекомендовано до видання Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 27.11.2025 р.)

Рецензенти:

В. В. Грабко, доктор технічних наук, професор, ВНТУ

О. П. Чорний, доктор технічних наук, професор, КРНУ

Бурбело, М. Й.

Б91 Керування силовими активними фільтрами за наявності коливань напруги в розподільних електричних мережах: монографія [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, Д. Ю. Лебедь. – Вінниця: ВНТУ, 2026. – (PDF, 114 с.)

ISBN 978-617-8163-77-8 (PDF)

Монографія присвячена системам керування силовими активними фільтрами для підвищення якості фільтрування вищих гармонік і зменшення коливань напруги в розподільних електричних мережах за наявності швидкозмінних та нелінійних навантажень. Встановлено нові закономірності керування паралельним силовим активним фільтром та уніфікованим регулятором якості електроенергії. Застосовано адаптивне налаштування інтервалу часу інтегрування активної та реактивної складових струму керування та часу затримки сигналів системи керування паралельним силовим активним фільтром. Удосконалено принцип побудови системи керування уніфікованим регулятором якості електроенергії.

УДК 621.316.1

ISBN 978-617-8163-77-8 (PDF)

ISBN 978-966-641-982-1 (друк)

© М. Бурбело, Д. Лебедь, 2026

© ВНТУ, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИЛОВИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА НАЯВНОСТІ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ	8
1.1 Характеристика коливань напруги	8
1.2 Силові активні фільтри	11
1.3 Характеристика уніфікованого регулятора якості електроенергії	14
1.4 Системи керування силовими активними фільтрами	20
РОЗДІЛ 2. ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ ЗА ШВИДКИХ ЗМІН НАПРУГИ	25
2.1 Аналіз режиму пасивної компенсації реактивної потужності паралельним силовим активним фільтром	25
2.2 Аналіз режимів активної компенсації реактивної потужності паралельним силовим активним фільтром	28
2.3 Встановлення закономірностей керування уніфікованим регулятором якості електроенергії	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ ЗА НАЯВНОСТІ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ	42
3.1 Функціональна схема системи керування силовим активним фільтром за наявності коливань напруги	42
3.2 Розробка системи керування напругою конденсатора силового активного фільтра з елементом затримки в часі	44
3.3 Розробка системи керування напругою конденсатора із застосуванням цифрових фільтрів.....	51

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ТА УНІФІКОВАНОГО РЕГУЛЯТОРА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРО- ЕНЕРГІЇ ЗА НАЯВНОСТІ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ.....	57
4.1 Моделювання паралельного САФ за наявності коливань напруги та гармонічних спотворень.....	60
4.2 Аналіз роботи УРЯЕ за швидкозмінних навантажень.....	65
4.3 Моделювання послідовно-паралельного УРЯЕ в режимі ком- пенсації швидких змін напруги та вищих гармонік струму	73
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ОДНОФАЗНИХ САФ і УРЯЕ ЗА ШВИДКИХ ЗМІН НАПРУГИ.....	79
5.1 Практична реалізація однофазного паралельного САФ.....	79
5.2 Практичні рекомендації щодо реалізації послідовно- паралельного УРЯЕ.....	85
5.3 Дослідження квазіперіодичних коливань напруги у мережах із застосуванням УРЯЕ.....	90
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
ДОДАТКИ.....	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ВГ – вищі гармоніки
- РМ – розподільні мережі
- САФ – силовий активний фільтр
- СКВШ – система керування високої швидкодії
- СКСШ – система керування середньої швидкодії
- УРЯЕ – уніфікований регулятор якості електроенергії
- ФАПЧ – фазове автопідлаштування частоти
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція
- ЯЕ – якість електричної енергії
- АС – змінний струм
- DC – постійний струм
- IGBT – інтегральний транзистор з ізольованим затвором
- ПІІ – цифровий фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою
- ФІІ – цифровий фільтр з скінченною імпульсною характеристикою
- ПІ – пропорційно-інтегрувальний (регулятор)
- ТНД – коефіцієнт гармонічних спотворення

ВСТУП

Наявність в електричних мережах напругою 0,4 кВ коливань та несинусоїдності напруги погіршують стабільність і ефективність роботи багатьох електроприймачів. Особливо це важливо для таких сфер, як медицина, фармацевтика, телекомунікації, фінанси та інформаційні технології, в яких є істотна частка неконвенційних електричних навантажень і які критичні до зниження якості електроенергії [1].

Дослідженню зменшення коливань напруги з використанням САФ присвячено низку наукових праць [2]-[8]. Не зважаючи на ці дослідження в області використання САФ та результатів їх впровадження, в даний час відсутні чіткі рекомендації щодо побудови систем керування САФ за наявності коливань та несинусоїдності напруги в розподільних електричних мережах.

Впровадження САФ в розподільні електричні мережі є досить актуальним, оскільки впливає на низку ключових аспектів, зокрема:

- 1) стабільність напруги: електричні мережі повинні забезпечувати стабільний рівень напруги в межах припустимих величин, оскільки зміни напруги можуть призводити до несправностей та пошкодження обладнання;
- 2) відсутність гармонічних спотворень напруг: наявність високоякісного струму без перешкод або шумів дуже важлива для деяких видів обладнання, таких як медичне або наукове обладнання, а також комп'ютерні системи, які можуть бути чутливими до завад в електричних мережах;
- 3) відсутність короткочасних переривань в електропостачанні: стале електропостачання є важливим для безперебійної роботи, особливо у сферах, де відмова в постачанні електроенергії може мати серйозні наслідки.

Особливо це важливо в сучасних умовах, коли зростає популярність розумних пристроїв у побуті, а вимоги до якості електроенергії стають ще більш суттєвими. З розвитком сучасних технологій та впровадженням концепції «розумна мережа» (Smart Grid), яка базується на використанні цифрових технологій для керування та моніторингу електричних мереж, питання забезпечення якості електроенергії стає ще більш актуальним.

Забезпечення якості електроенергії також є важливим для розвитку відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Ці джерела енергії чутливі до коливань напруги, тому необхідно забезпечити стабільну та якісну електроенергію для їх використання.

Наукова новизна роботи полягає у: встановленні нових закономірностей керування паралельним силовим активним фільтром та уніфікованим регулятором якості електроенергії за коливань напруги з урахуванням обмежень їх потужності та вимог щодо коливань напруги, що забезпечує вибір параметрів їх систем керування; вперше застосовано адаптивне налаштування інтервалу часу інтегрування активної та реактивної складових струму керування та часу затримки сигналів системи керування паралельним силовим активним фільтром, що забезпечує високу швидкодію роботи паралельного силового активного фільтра; удосконалено принцип побудови системи керування уніфікованим регулятором якості електроенергії за рахунок застосування цифрового фільтра зі скінченою імпульсною характеристикою в системі керування напругою накопичувального конденсатора, що забезпечує підвищення стабільності напруги на конденсаторі за зовнішніх збурень.

Практична цінність результатів монографії має чітку прикладну орієнтацію, що підтверджується: технічним спрямуванням на вирішення проблеми динамічної компенсації коливань напруги в реальних мережах 0,4–10 кВ; застосуванням адаптивного керування в системах реального часу з використанням цифрових фільтрів FIR/IIR; впровадженням результатів у виробництво; створенням моделей, які можуть бути інтегровані у Smart Grid-рішення або вбудовані в промислові ПЛК/контролери; формуванням інженерних рекомендацій щодо реалізації однофазних активних фільтрів.

ВИСНОВКИ

Дослідження, проведене в рамках монографії дозволило сформулювати низку ключових висновків, які мають теоретичне та практичне значення для підвищення якості фільтрування вищих гармонік і зменшення коливань напруги в розподільних електричних мережах за наявності швидкозмінних та нелінійних навантажень:

1. На основі аналізу режиму пасивної компенсації реактивної потужності паралельним САФ показано, що в цьому режимі коливання напруги на навантаженні компенсуються частково. Режим активної компенсації реактивної потужності дозволяє забезпечити стабільність напруги на навантаженні. Проте за такого режиму САФ повинен володіти широким діапазоном регулювання реактивної потужності. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано використання послідовно-паралельного та паралельно-послідовного УРЯЕ, що дозволяють стабілізувати заданий рівень напруги. Проаналізовано ефективність зменшення коливань напруги за допомогою УРЯЕ. Результати досліджень показали, що УРЯЕ забезпечує стабільну роботу навіть за умови порівняно невеликої потужності інверторів напруги.

2. Розроблені математичні моделі, що описують поведінку УРЯЕ при зміні напруги у вузлі мережі, які дозволили встановити закономірності впливу параметрів регулювання на стабільність напруги. Застосування цих моделей дозволяє прогнозувати поведінку системи в умовах різних типів регулювання та визначити оптимальні параметри для досягнення максимальної стабільності напруги, що є важливим для забезпечення високої якості електроенергії.

3. Удосконалено систему керування паралельним САФ із застосуванням адаптивного елемента затримки в часі в системі регулювання напруги конденсатора, що забезпечує підвищення стабільності напруги на конденсаторі за зовнішніх збурень. Розроблено схему керування на основі *FIR*-фільтра, яка продемонструвала підвищену ефективність у компенсації вищих гармонік струму і забезпечила стабільність напруги при швидких змінах навантаження.

4. Результати моделювання підтвердили, що схема керування САФ на основі *FIR*-фільтра забезпечує найвищий рівень компенсації гармонічних спотворень. Встановлено, що за допомогою силових активних фільтрів можна досягти високого рівня корекції параметрів якості електроенергії за декількома важливими показниками, зокрема, за рівнем загальних гармонічних спотворень напруги та струму, а також за інтенсивністю флікера напруги мережі. Таке вирішення має важливе значення для сучасних електричних мереж, що зазнають постійного впливу швидкозмінних та нелінійних навантажень, які можуть негативно впливати на стабільність електропостачання.

5. Подальшого розвитку набула система керування УРЯЕ із застосуванням цифрового *FIR*-фільтра та регулятора затримки для стабілізації напруги конденсатора та зменшення коливань напруги в електричній мережі. Аналіз показав, що впровадження *FIR*-фільтра у систему керування УРЯЕ дозволяє досягти високої точності регулювання напруги на конденсаторах та мінімізації гармонічних спотворень. Для зменшення швидких змін напруги та інтенсивності флікера в мережі, за допомогою УРЯЕ, найкращий результат моделювання показала система керування напругою конденсатора з регулятором затримки.

6. Розроблено дослідний зразок однофазного САФ на базі мікроконтролера *ESP32*. Визначено умови працездатності системи керування та виділено ключові аспекти побудови принципів схем однофазних САФ такі як: топологія силової частини, формування кола постійної напруги, датчики струму та напруги, схема керування драйверами силових транзисторів, алгоритм регулювання та побудова зворотного зв'язку.

7. Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера *ESP32*, що дозволяє виділити пульсуючі складові гармонік та згенерувати струм компенсації для роботи однофазного силового активного фільтра.

8. Проведено аналіз УРЯЕ на можливість виникнення резонансних явищ. Встановлено, що у випадку шунтування вторинної обмотки трансформатора послідовного САФ за допомогою фільтруючого конденсатора, можуть виникати резонансні явища, які можна компенсувати при шунтуванні вторинної обмотки даного трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] О. Г. Гриб, А. А. Кононенко, В. С. Строкань та І. В. Павленко, "Аналіз споживання електроенергії з контролем якості в розподільних мережах", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, вип. 165, с. 9–10, 2015.
- [2] Н. Akagi, "Active harmonic filters", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, 2005.
- [3] Н. Akagi, "Modern active filters and traditional passive filters", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 54, no. 3, 2006.
- [4] Н. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, 1996.
- [5] Н. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984.
- [6] Н. Akagi, A. Nabae, and S. Atoh, "Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 460–465, 1986.
- [7] Н. Akagi and A. Nabae, "The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 3, no. 1, pp. 27–31, 1993.
- [8] Н. Akagi, "Trends in active power line conditioners", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 263–268, 1994.
- [9] *Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності*, ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). Київ, Україна: Держстандарт України, 2023.
- [10] *Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Гранично допустимі рівні. Нормування змін напруги, флуктуацій напруги і флікера в низьковольтних системах електропостачання загальної призначеності для обладнання з номінальним струмом силою не більше ніж 16 А на фазу, яке не підлягає обумовленому підключенню*, ДСТУ EN 61000-3-3:2017 (EN 61000-3-3:2013, IDT; IEC 61000-3-3:2013, IDT).

[11] В. Г. Гапанович, О. І. Маврін, і В. П. Олійник, "Дослідження ефективності компенсації коливань напруги в системі електропостачання дугової сталетопної печі", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 615, Електроенергетичні та електромеханічні системи, с. 33–39, 2008.

[12] Ю. О. Варецький і В. Г. Гапанович, "Регулювання СТК для компенсації струмів увімкнення трансформаторів у системі електропостачання ДСП", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 671, Електроенергетичні та електромеханічні системи, с. 16–20, 2010.

[13] M. Awad, "Review Power Quality Issues", *Modern Applied Science*, vol. 6, 2012, doi: 10.5539/mas.v6n2p52.

[14] H. Guentri, B. Boutaleb, B. Benazzedine, and K. Ezzaeri, "The Impact of Motor Starting on the Quality of the Industrial Electricity Network", *ITEGAM - Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)*, vol. 6, pp. 41-51, 2020, doi: 10.5935/jetia.v6i26.722.

[15] Ю. О. Варецький, Я. С. Пазина, і О. М. Равлик, "Проектна оцінка показників компенсованого флікеру", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 418, Електроенергетичні та електромеханічні системи, с. 15–21, 2001.

[16] В. В. Бурлака, С. К. Поднебенна, С. В. Гулаков, *Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності: Монографія*. Маріуполь: ПДТУ, 2015. 196 с.

[17] A. Govind, A. Prakash, and P. Kumar, "Performance enhancement of shunt active power filter application using adaptive neural network", *Journal of Power Technologies*, vol. 101, no. 1, pp. 78–85, 2021.

[18] N. Hamouda, B. Badreddine, A. Boutaghane, S. Kahla, R. Amraoui, and M. Mezaach, "Improving the Power Quality of the Arc Welding Supply using an Active Power Filter", in *Proc. 6th Int. Conf. on Welding, Non Destructive Testing and Materials Industry (IC-WNDT-MI'18)*, Nov. 7–8, 2018.

[19] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art", *IEEE Proceedings*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, Dec. 2005.

[20] L. B. G. Campanhol, S. A. O. Silva, and A. Goedel, "Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power

compensation in three-phase four-wire systems", *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 11, pp. 2825–2836, 2014.

[21] S. H. Hosseini, M. T. Haque, and S. Shahmohammadi, "A shunt active power filter control for unbalanced conditions", in *Proc. 10th IEEE Int. Conf. Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2003)*, Sharjah, UAE, 2003, vol. 2, pp. 830–833, doi: 10.1109/ICECS.2003.1301915.

[22] P. Salmeron and S. P. Litran, "Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 1058–1067, 2010.

[23] M. Nasiri, A. Doroudi, and H. Sheikholahi, "A new control circuit for series active filters to eliminate voltage flicker and harmonics", in *Proc. 17th Conf. Electrical Power Distribution (EPDC 2012)*, 2012, pp. 1–4.

[24] S. Biricik and H. Komurcugil, "Three-level hysteresis current control strategy for three-phase four-switch shunt active filters", *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 8, pp. 1732–1740, 2016.

[25] A. M. Gee, F. Robinson, and W. Yuan, "A superconducting magnetic energy storage-emulator/battery supported dynamic voltage restorer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 1, pp. 55–64, 2017, doi: 10.1109/TEC.2016.2609403.

[26] M. A. Mulla, C. Rajagopalan, and A. Chowdhury, "Hardware implementation of series hybrid active power filter using a novel control strategy based on generalized instantaneous power theory", *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 592–600, 2013.

[27] S. Aravind, U. Vinatha, and V. N. Jayasankar, "Wind-solar grid connected renewable energy system with series active self-tuning filter", in *Proc. 2016 Int. Conf. Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 2016, pp. 1944–1948.

[28] О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей, "Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посіб". Київ: Кондор, 2005. 408 с.

[29] S. M. Halpin, R. Bergeron, T. Blooming, R. F. Burch, L. E. Conrad, and T. S. Key, "Voltage and lamp flicker issues: Should the IEEE adopt the IEC approach?", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 200–206, 2003.

[30] A. Szromba, "The unified power quality conditioner control method based on the equivalent conductance signals of the compensated load", *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6298, 2020, doi: 10.3390/en13236298.

[31] N. Khosravi, A. Abdolvand, A. Oubelaid, et al., "Improvement of power quality parameters using modulated-unified power quality conditioner and switched-inductor boost converter by the optimization techniques for a hybrid AC/DC microgrid", *Scientific Reports*, vol. 12, p. 21675, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-26001-8.

[32] H. Bueno-Contreras, G. A. Ramos, and R. Costa-Castelló, "Power quality improvement through a UPQC and a resonant observer-based MIMO control strategy", *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 6938, 2021, doi: 10.3390/en14216938.

[33] V. Khadkikar, P. Agarwal, A. Chandra, A. Barry, and T. A. Nguyen, "A simple new control technique for unified power quality conditioner (UPQC)", in *Proc. 2004 11th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power*, Lake Placid, NY, USA, 2004, pp. 289–293, doi: 10.1109/ICHQP.2004.1409369.

[34] V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, "Power quality enhancement utilizing single-phase unified power quality conditioner: digital signal processor-based experimental validation", *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 323–331, 2011, doi: 10.1049/iet-pel.2010.0031.

[35] G. Maozhong, L. Hankui, G. Hanjun, and X. Dianguo, "Active voltage regulator based on novel synchronization method for unbalance and fluctuation compensation", in *Proc. 28th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain, Nov. 2002, pp. 1374–1379, doi: 10.1109/iecon.2002.1185476.

[36] I. Axente, J. N. Ganesh, M. Basu, M. F. Conlon, and K. Gaughan, "A 12-kVA DSP-controlled laboratory prototype UPQC capable of mitigating unbalance in source voltage and load current", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1471–1479, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2040635.

[37] A. Esfandiari, M. Parniani, and H. Mokhtari, "Mitigation of electric arc furnace disturbances using the unified power quality conditioner", in *Proc. 30th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2004)*, Busan, South Korea, Nov. 2004, pp. 1469–1474, doi: 10.1109/IECON.2004.1431795.

[38] H. Fujita and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 315–322, 1998, doi: 10.1109/63.662847.

[39] G. Siva Kumar, B. Kalyan Kumar, and M. Mahesh Kumar, "Optimal VA loading of UPQC during mitigation of unbalanced voltage sags with phase jumps in three-phase four-wire distribution system", in *Proc. 2010 Int. Conf. Power System Technology (POWERCON 2010)*, Zhejiang, China, Oct. 2010, pp. 1–8, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666492.

[40] A. Elnady, W. El-Khattam, and M. M. A. Salama, "Mitigation of AC arc furnace voltage flicker using the unified power quality conditioner", in *Proc. Winter Meeting Power Engineering Society*, New York, NY, USA, Jan. 2002, pp. 735–739, doi: 10.1109/PESW.2002.985101.

[41] V. Khadkikar, A. Chandra, A. Barry, and T. Nguyen, "Application of UPQC to protect a sensitive load on a polluted distribution network", in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, QC, Canada, June 2006, doi: 10.1109/PES.2006.1709522.

[42] R. J. Millnitz dos Santos, J. C. da Cunha, and M. Mezaroba, "A simplified control technique for a dual unified power quality conditioner", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, 2014.

[43] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2015.

[44] Q. Xu, F. Ma, Z. He, and H. Xiao, "Analysis and control of M3C-based UPQC for power quality improvement in medium/high-voltage power grid", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 12, 2016.

[45] M. Diab, M. El-Habrouk, T. H. Abdelhamid and S. Deghedie, "Survey of Active Power Filters Configurations", *IEEE international conference on system, computation, automation and networking (icscan)*, Pondicherry, India, 2018, pp. 1-14, doi: 10.1109/ICSCAN.2018.8541225.

[46] M. Kesler and E. Ozdemir, "Simplified Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC)", *RE&PQJ*, vol. 1, no. 7, Apr. 2009.

[47] K. Kumar and I. Karuppasamy, "Design of Series Active Filter for Power Quality Improvement", in *2014 International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE)*, pp. 78-82, 2015, doi: 10.1109/ICECCE.2014.7086639.

[48] S. Biricik, "Design of Unified Power Quality Conditioner for Power Quality Improvement in Distribution Network", *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, pp. 47–52, 2018, doi: 10.17694/bajece.402009.

[49] B. S. Niranjana and D. Kumar, "Power Quality Improvement by Using UPQC in Wind Energy Conversion System", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 8, no. 3, Mar. 2019.

[50] B. Han, B. Bae, S. Baek, and G. Jang, "New configuration of UPQC for medium-voltage application", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1438–1444, Jul. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.860235.

[51] S. A. González and M. I. Valla, "UPQC implemented with Cascade Asymmetric Multilevel Converters", *Electric Power Systems Research*, vol. 124, pp. 144–151, 2015.

[52] S. B. Shahapure, V. A. Kulkarni (Deodhar), and R. P. Hasabe, "Performance Analysis of Renewable Integrated UPQC", *International Journal of Electrical and Electronics Research (IJEER)*, vol. 10, no. 3, pp. 508–517, 2022, doi: 10.37391/IJEER.100318.

[53] V. Balaji and C. Subramanian, "Power quality management in electrical grid using SCANN controller-based UPQC", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 72, no. 1, pp. 140257-140257, 2024, doi: 10.24425/bpasts.2022.140257.

[54] P. Deshpande, A. Shrivastava, and A. Khare, "Different Modeling Aspects and Energy Systems of Unified Power Quality Conditioner (UPQC): An Overview", *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 3, no. 2, 2013.

[55] Y. Pal, A. Swarup, and B. Singh, "A Novel Control Strategy of Three-phase, Four-wire UPQC for Power Quality Improvement", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2012.

[56] V. R. Illa, R. Senapati, and S. C. Swain, "Implementation of UPQC Alleviating Power Quality Issues in a Hybrid Grid Integrated System", *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 16, pp. 316–335, 2021.

[57] B. S. Rao, N. Sowjanya, M. Bhaskararao, and S. Nagaraju, "Esa Based UPQC Controller to Improve Power Quality in Microgrid System", *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 9, no. 2, Dec. 2019.

[58] B. Han, B. Bae, H. Kim, and S. Baek, "Combined Operation of Unified Power-Quality Conditioner With Distributed Generation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, Jan. 2006.

[59] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, "Integration of UPQC for Power Quality Improvement in Distributed Generation Network – A Review", in *Proc. ISGT Europe 2011*, Manchester, UK, Dec. 2011, doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162813.

[60] A. Shrivastava, P. Deshpande, and A. Khare, "Integration of UPQC with PV Arrays for Power Quality Enhancement", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 2, Feb. 2014.

[61] D. Prathyusha and P. Venkatesh, "Power Quality improvement of a three phase four wire system using UPQC", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 2, no. 4, Jul. 2015.

[62] J. Ye, *Optimal design and control implementation of unified power quality conditioner*, Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2018.

[63] V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, "Steady state power flow analysis of unified power quality conditioner (UPQC)", in *Proc. 2005 International Conference on Industrial Electronics and Control Applications*, Quito, Ecuador, 2005, doi: 10.1109/ICIECA.2005.1644367.

[64] K. K. Swamy and G. Ramakrishna, "Comprehensive review on UPQC to enhance the Power quality at distribution levels", *International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences*, vol. 8, no. 1, Jan. 2018.

[65] D. M. Matlani and M. D. Solanki, "A Rigorous Overview of Unified Power Quality Conditioner for Alleviation of Power Quality Issues", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 9, no. 6, Jun. 2020.

[66] S. Wang, L. Han, and K. Chen, "Comprehensive Coordinated Control Strategy of Virtual Synchronous Generators Under Unbalanced Power Grid", *Journal of Power Electronics*, vol. 19, pp. 1554–1565, 2019.

[67] D. Wu, Y. Che, and K. W. E. Cheng, "Design and performance of a shunt active power filter for three-phase four-wire system", in *Proc. IEEE Conference*, 2009, pp. 1–4.

[68] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Shunt Active Filters. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley-IEEE Press, 2007, pp. 109–220.

[69] A. Gheewala et al., "Load Balancing and Harmonic Elimination Using Distribution Static Synchronous Compensator (D-STATCOM)", *International Journal of Engineering and Techniques*, vol. 2, no. 2, pp. 30–35, Mar.–Apr., 2016.

[70] R. K. Patjoshi and K. K. Mahapatra, "Performance comparison of direct and indirect current control techniques applied to a sliding mode based shunt active power filter", in *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, IIT Bombay, Dec. 2013, pp. 1–5.

[71] S. D. Swain, P. K. Ray, and K. B. Mohanty, "Improvement of Power Quality Using a Robust Hybrid Series Active Power Filter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 3490–3498, 2017.

[72] H. Komurcugil and S. Biricik, "Time-Varying and Constant Switching Frequency-Based Sliding-Mode Control Methods for Transformerless DVR Employing Half-Bridge VSI", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 2570–2579, Apr. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2636806.

[73] F. Jiang et al., "Multilevel Cascaded-Type Dynamic Voltage Restorer With Fault Current-Limiting Function", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, pp. 1261–1269, 2016.

[74] E. Babaei, M. F. Kangarlu, and M. Sabahi, "Dynamic voltage restorer based on multilevel inverter with adjustable dc-link voltage", *IET Power Electronics*, vol. 7, pp. 576–590, 2014.

[75] A. Moghassemi and S. Padmanaban, "Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations", *Energies*, vol. 13, 2020, doi: 10.3390/en13164152.

[76] D. Wu, Y. Che, and K. W. E. Cheng, "Design and performance of a shunt active power filter for three-phase four-wire system", in *Proc. IEEE Conference*, 2009, pp. 1–4.

[77] F. Jonsson, *Design and Calibration of Integrated PLL Frequency Synthesizers*, M.S. thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Apr. 2008.

[78] Y. Xu, J. D. Kueck, L. M. Tolbert, and D. T. Rizy, "Voltage and Current Unbalance Compensation Using a Parallel Active Filter", in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, FL, USA, 2007, pp. 2919–2925, doi: 10.1109/PESC.2007.4342485.

[79] R. Bachar, A. Golea, M. T. Benchouia, and M. Chebaani, "High-performance active power filter implementation based on predictive current control", *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. 10, no. 1, pp. 277–287, Mar. 2019.

[80] M. H. Rashid (Ed.), *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications Handbook*, 3rd ed. ISBN 978-0-12-382036-5.

[81] H. Fujita and H. Akagi, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems – Series Connection of Passive and Active Filters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, pp. 1020–1025, 1991.

[82] M. McGranaghan and D. Mueller, "Designing Harmonic Filters for Adjustable Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 312–318, 1999.

[83] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, 2000.

[84] V. Soares, P. Verdelho, and G. Marques, "Active Power Filters Control Circuit Based on the Instantaneous Active and Reactive Current i_d - i_q Method", in *Proc. IEEE-PESC*, Jun. 1997, pp. 1096–1108.

[85] S. Mendalek, K. Al-Haddad, L. A. Dessaint, and F. Fnaiech, "Nonlinear Control Strategy for a Shunt Active Power Filter," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 42–45, June 2003.

[86] J. Matas et al., "Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 116–125, 2008.

[87] R. K. Patjoshi, K. Mahapatra, and V. R. Kolluru, *Real Time Implementation of Sliding Mode Based Direct and Indirect Current Control Techniques for Shunt Active Power Filter*, National Institute of Technology Rourkela, India, vol. 10, pp. 186–197, 2015.

[88] Rodríguez Monter, A., Bueno, E., Mayor, Á., Rodríguez, F., & Garcia-Cerrada, A., "Voltage support provided by STATCOM in unbalanced power systems", *Energies*, vol. 7, pp. 1003–1026, 2014, doi: 10.3390/en7021003.

[89] D. Chatterjee, G. Mandal, and M. Kharat, "Voltage Regulator Using PI Controller", *National Institute of Technology Tiruchirappalli*, 2018, doi: 10.13140/RG.2.2.26499.14885.

[90] T. B. Lazzarin and I. Barbi, "DSP-Based Control for Parallelism of Three-Phase Voltage Source Inverter", *IEEE Trans. Industr. Informat.*, vol. 9, no. 2, pp. 749-759, 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2223477.

[91] A. Shufian, S. Shib, D. Dipto, M. T. Rahman, N. Hannan, and S. A. Fattah, "Fuzzy logic-controlled three-phase dynamic voltage restorer for enhancing voltage stabilization and power quality", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 166, p. 110517, 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110517.

[92] S. Bukka, M. Y. M. Hakim, S. T. M, and S. G. Ankaliki, "Performance analysis of three phase shunt hybrid active power filter", *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, Mar. 2014, eISSN: 2319-1163, pISSN: 2321-7308.

[93] Т. Мисак, "Аналіз стійкості системи стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі трифазного паралельного активного фільтра", *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 12-17, 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.012>.

[94] К. Денисенко, В. Лесик, та Т. Мисак, "Вплив фільтра в каналі керування контуром стабілізації напруги накопичувального конденсатора на динаміку трифазного паралельного активного фільтра", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 58, трав. 2021, с. 55-65.

[95] К. І. Денисенко, І. С. Кутрань, В. О. Лесик, та Т. В. Мисак, "Збільшення швидкодії контуру слідкування за напругою накопичувального конденсатора трифазного паралельного активного фільтра", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 55, 2020.

[96] N. Prajapati, N. Shah, and Dr. Bhojani, "Power Quality Improvement using Different Types of Filters in Electrical Power System", *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, pp. 2394-2400, 2019, doi: 10.35940/ijeat.F9224.109119.

[97] K. Konala, M. Rao, and S. Gawre, "Improvement of Power Quality Using Series Active Power Filter (SAPF)", in *Proc. 2020 IEEE Int. Students' Conf. Electr., Electron. Comput. Sci. (SCEECS)*, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.151.

[98] M. Burbelo, O. Babenko, Y. Loboda, D. Lebed, O. K. Kolesnytskyj, S. J. Rakhmetullina, and M. Mussabekov, "Automatic adjustment of reactive power by FACTS devices under conditions of voltage instability in the electric network", *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 13, no. 4, pp. 109–113, 2023, doi: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5377>.

[99] Д. Ю. Лебедь, М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, О. В. Бабенко, Ю. П. Войтюк, "Симетрування напруг і струмів розподільних електричних мереж за допомогою об'єднаного регулятора якості електроенергії", в *Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції «ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ» (ОКЕУ 2021)*, Вінниця, 19–21 жовтня 2021 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey2021/paper/view/13716>.

[100] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, і Д. Ю. Лебедь, "Підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі активного фільтра", *Вісник ВПШ*, вип. 1, с. 28–34, берез. 2022.

[101] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, і Д. Ю. Лебедь, "Система прямого керування струмом активного фільтра", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 69–75, 2021, doi: 10.31649/1997-9266-2021-155-2-69-75.

[102] М. Й. Бурбело, Д. Ю. Лебедь, і О. Р. Лещенко, "Оптимізація часу заряду/розряду конденсаторів активного фільтра під час коливань напруги", *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, т. 309, № 3, с. 119–124, 2022, doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-119-124>.

[103] М. Й. Бурбело і Д. Ю. Лебедь, "Розробка цифрового блоку схеми керування напругою конденсатора активного фільтра", в *Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 31 травня 2022 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2022/paper/view/15298>.

[104] Д. Ю. Лебедь, "Розробка пристрою керування силовим активним фільтром на платформі ESP32", in *Збірник наукових праць 17-ої міжнародної конференції КУСС-2024*, Вінниця, 16–17 жовтня 2024 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2024/paper/view/21931>.

[105] G. B. Thomas, Jr., M. D. Weir, and J. Hass, *Thomas' calculus: early transcendentals*, 13th ed., revised by M. D. Weir and J. Hass. Massachusetts Institute of Technology: Pearson, 2013.

[106] W. L. Hallauer Jr., *Introduction to Linear, Time-Invariant, Dynamic Systems for Students of Engineering*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016.

[107] F. Taylor, *Digital Filters: Principles and Applications with MATLAB*. Wiley-IEEE Press, 2012, p. 320.

[108] F. Ronchi, A. Tilli, and L. Marconi, "Control of shunt active filter based on the internal model principle: Tuning procedure and experimental results", in *2003 European Control Conference (ECC)*, 2003, pp. 2327–2332.

[109] B.-M. Han, B.-Y. Bae, and S. J. Ovaska, "Reference signal generator for active power filters using improved adaptive predictive filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 576–584, Apr. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.844222.

[110] J. Li, G. Deng, W. Wei, H. Wang, and Z. Ming, "Design of a real-time ECG filter for portable mobile medical systems", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 696–704, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2612222.

[111] K. Ichige, M. Iwaki, and R. Ishii, "Accurate estimation of minimum filter length for optimum FIR digital filters", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 47, pp. 1008–1016, Oct. 2000, doi: 10.1109/82.877143.

[112] M. Tohidian, I. Madadi, and R. Staszewski, "Analysis and design of a high-order discrete-time passive IIR low-pass filter", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, pp. 2575–2587, 2014, doi: 10.1109/JSSC.2014.2359656.

[113] ДСТУ EN 62586-2:2018, *Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності* (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT).

[114] 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, 2021, doi: 10.37917/ijeee.17.2.16.

[115] Y. Xu, X. Xiao, Y. Sun, and Y. Long, "Voltage sag compensation strategy for unified power quality conditioner with simultaneous reactive power injection", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, 2016, doi: 10.1007/s40565-016-0183-x.

[116] Д. Ю. Лебедь and М. Й. Бурбело, "Аналіз помилок уніфікованого регулятора якості електроенергії", *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетика: надійність та енергоефективність»*, т. 7, № 2, с. 42–48, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.03>.

[117] М. Й. Бурбело і Д. Ю. Лебедь, "Дослідження ефективності схеми керування напругою конденсатора уніфікованого регулятора якості електроенергії для зменшення коливань напруги", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, т. 166, № 1, с. 21–28, 2023, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-2128>.

[118] М. Й. Бурбело і Д. Ю. Лебедь, "Аналіз ефективності роботи уніфікованого регулятора якості електроенергії для зменшення коливань напруги", в *Матеріали XVI Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2022)»*, Вінниця, 15–17 листопада 2022 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2022/paper/view/16485>.

[119] H. Okyere, M. Nibouche, H. Nouri, and O. Mrayat, "Application of DSPS and Microcontrollers in Voltage Source Inverters STATCOM Digital Designs: A Comparative Approach", in *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Signal Process. and Commun.*, ICSPC 2007, Dubai, 2007, pp. 321-324, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728320.

[120] S. Benavides Cordoba, J. Ortiz, J. Cano, N. Munoz, and J. López-Lezama, "Implementation of a Distribution Static Compensator D-STATCOM: Hardware and Firmware Description", *Scientia et Technica*, vol. 24, pp. 555-561, 2020, doi: 10.22517/23447214.21601.

[121] M. J. Triana Figueroa, J. L. Diaz Rodriguez, and A. Pardo Garcia, "Single-phase D-STATCOM prototype based on the use of an Arduino nano controller", in *Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development*, Buenos Aires, 2023, pp. 1031.

[122] M. Mangaraj and A. K. Panda, "DSTATCOM deploying CGBP based icos ϕ neural network technique for power conditioning", *Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India*, received Aug. 24, 2016, accepted Nov. 13, 2016, available online Nov. 18, 2016, version of record Dec. 28, 2018.

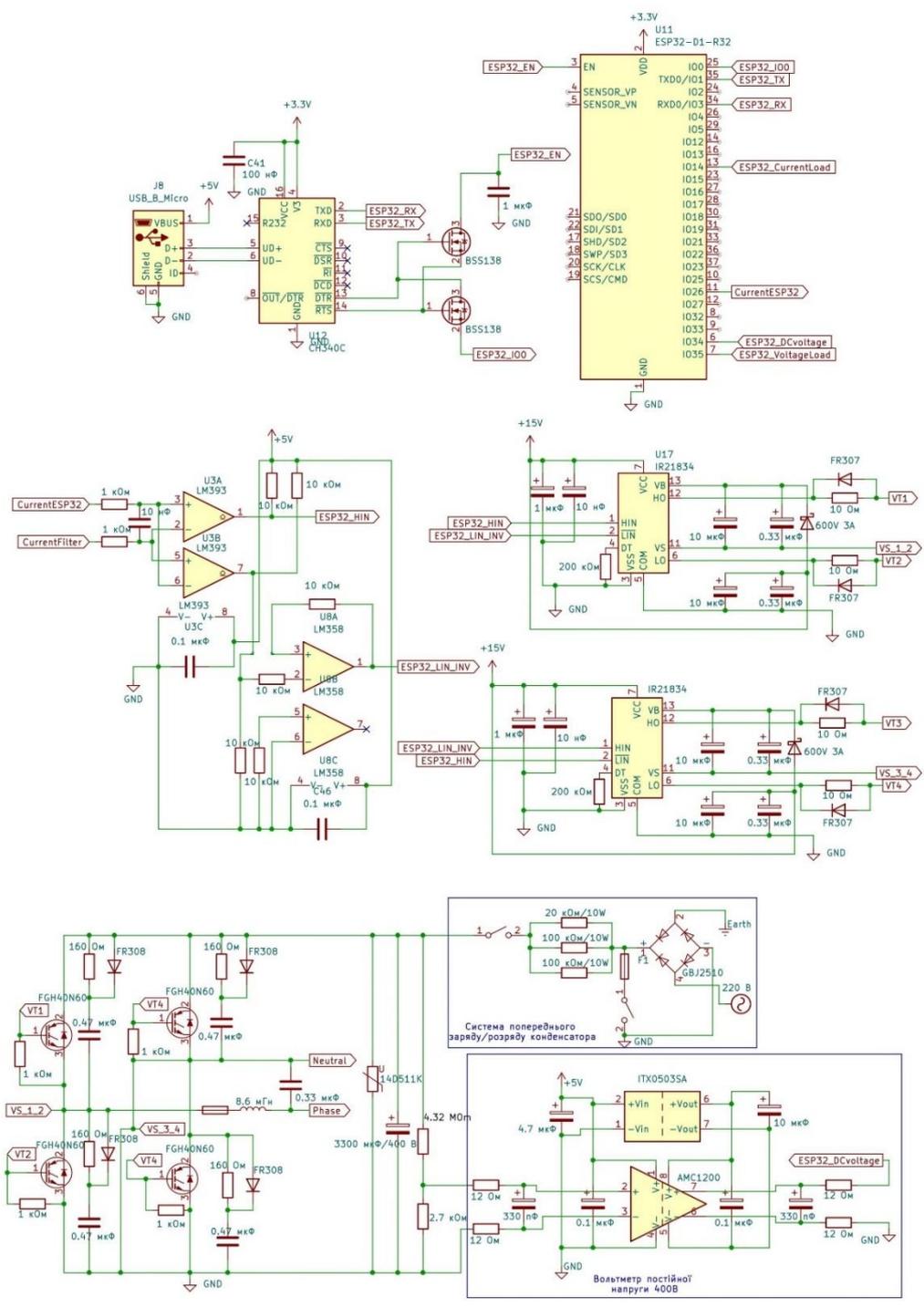
[123] Д. Ю. Лебедь, "Дослідження динаміки квазіперіодичних коливань у системах із застосуванням Unified Power Quality Conditioner", в *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)*, Вінниця, 20 травня 2024 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/view/19937>.

[124] Д. Ю. Лебедь, "Ефективність активного фільтра у зменшенні високочастотних шумів під час перехідних процесів у розподільчих електричних мережах", в *Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 20–22 березня 2024 р. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19926>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Принципова схема однофазного силового активного фільтра



Додаток Б

Код для програмування ESP32

```
#include <driver/adc.h>
#include <driver/dac.h>
#include <MeanCalculator.h>
#include <RMSPProcessor.h>
#include <cmath>
#include <WiFi.h>

const int currentLoad = 14;
const int voltageSource = 35;
const int DCvoltage = 34;

const float R1 = 6760.0, R2 = 11920.0;
const float R3 = 6710.0, R4 = 11930.0;
const float R5 = 6750.0, R6 = 11980.0;
const float R7 = 4317319.0, R8 = 2681.0;

const float V1 = 1.93, V2 = 1.3;
const float AMP1 = 325, AMP2 = -325;

inline float calculateAmplitude(float Vsource) {
    float slope = (AMP1 - AMP2) / (V1 - V2);
    float intercept = AMP1 - slope * V1;
    return slope * Vsource + intercept;
}

unsigned long previousMicrosCurrent = 0, previousMicrosVoltage = 0;
unsigned long previousMicrosFIR = 0, previousMicrosPWM = 0;
const unsigned long intervalSensors = 5, intervalFIR = 100, intervalPWM = 100;

float Ifilter = 0, Vdc = 0, Vamp = 0, Iload = 0, Vref = 340;
float dU = 0, FIRoutput = 0, Iref = 0;

float delayBuffer[300] = {0};
int delayIndex = 0;

float prevIntegrator = 0;
bool integratorReset = false;

MeanCalculator meanCalculator(2000); //Кількість зразків для усереднення
RMSPProcessor rmsProcessor(2000); //Кількість зразків для середнього
квадратичного

void ReadCurrent() {
    int currentLoadRaw;
```

```

    esp_err_t status = adc2_get_raw(ADC2_CHANNEL_6, ADC_WIDTH_BIT_12,
&currentLoadRaw);
    float currentL = (2.45 / 4095.0) * currentLoadRaw * ((R3 + R4) / R4);
    Iload = (currentL - 2.24) / 0.066;
    Serial.println(Iload);
}

void ReadVoltage() {
    float Vsource = (2.45 / 4095.0) * adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_7) * ((R1
+ R2) / R2);
    Vamp = calculateAmplitude(Vsource);
    Vdc = ((2.45 / 4095.0) * adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_6) * ((R7 + R8) /
R8));
}

void calculateFIR() {
    dU = Vref - Vdc;
    float delayedSignal = delayBuffer[delayIndex];
    delayBuffer[delayIndex] = dU;
    delayIndex = (delayIndex + 1) % 300;

    if (dU < 0 && !integratorReset) {
        prevIntegrator = 0;
        integratorReset = true;
    } else if (dU >= 0) {
        integratorReset = false;
    }
    prevIntegrator += dU;

    static float x1 = 0;
    if (integratorReset) x1 = 0;
    float FIRoutputTemp = -0.35 * delayedSignal + x1;
    x1 = delayedSignal;

    float sqrtOutput = (FIRoutputTemp >= 0) ? sqrt(FIRoutputTemp) : -
sqrt(-FIRoutputTemp);
    FIRoutput = FIRoutputTemp - sqrtOutput;
}

void calculatePWM() {
    float power = Vamp * Iload;
    meanCalculator.addValue(power);
    rmsProcessor.addValue(Vamp);
    float meanPower = meanCalculator.getMean();
    float rmsVoltage1 = pow(rmsProcessor.getRMS(), 2);
    float Ploss = meanPower - FIRoutput;
    float RMSloss = Ploss / rmsVoltage1;
    float VoltageRMS = RMSloss * Vamp;
}

```

```

Iref = Iload - VoltageRMS;

float IrefVoltage = Iref * 0.066 + 1.65;
int dacValue = (int)((IrefVoltage / 3.3) * 255.0);
int dacValueShifted = constrain(dacValue, 0, 255);
dac_output_voltage(DAC_CHANNEL_2, dacValueShifted);
}

void setup() {
  WiFi.mode(WIFI_OFF);
  Serial.begin(115200);
  adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
  adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_7, ADC_ATTEN_DB_11);
  adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_6, ADC_ATTEN_DB_11);
  adc2_config_channel_atten(ADC2_CHANNEL_6, ADC_ATTEN_DB_11);

  // Ініціалізація DAC згідно з документацією ESP-IDF
  dac_output_enable(DAC_CHANNEL_2); // DAC2 на GPIO26
}

void loop() {
  unsigned long currentMicros = micros();

  if (currentMicros - previousMicrosCurrent >= intervalSensors) {
    previousMicrosCurrent = currentMicros;
    ReadCurrent();
  }

  if (currentMicros - previousMicrosVoltage >= intervalSensors) {
    previousMicrosVoltage = currentMicros;
    ReadVoltage();
  }

  if (currentMicros - previousMicrosFIR >= intervalFIR) {
    previousMicrosFIR = currentMicros;
    calculateFIR();
  }

  if (currentMicros - previousMicrosPWM >= intervalPWM) {
    previousMicrosPWM = currentMicros;
    calculatePWM();
  }
}

```

Електронне наукове видання

Бурбело Михайло Йосипович

Лебедь Денис Юрійович

**КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ ЗА
НАЯВНОСТІ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис оформив *Д. Лебедь*

Оригінал-макет виготовлено в *РВВ ВНТУ*

Підписано до видання 30.01.2026 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2026-005.

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv@vntu.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2023 р.