

Аналіз проблеми генерації реактивної енергії у торгових центрах

В. О. Разінков

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У даній статті представлено результати експериментальних вимірювань електроспоживання одного з торгових центрів, основною функцією якого є здійснення роздрібною торгівлі. Аналіз зібраних даних засвідчив наявність потреби у компенсації ємнісної реактивної потужності в окремих торгових приміщеннях, де основними джерелами навантаження виступають світлодіодні освітлювальні системи та імпульсні блоки живлення електронного обладнання.

Вимірювання проводилися протягом двох тижнів із 24-годинною дискретністю з метою охоплення повного спектра коливань навантаження, притаманного добовим циклом роботи ТЦ. Результати засвідчили, що основним джерелом генерації реактивної енергії є LED-світильники, особливо при їхній роботі в режимі часткового навантаження або за наявності гармонічних спотворень, спричинених імпульсними драйверами. Під час дослідження також було вивчено наукові публікації, які підтверджують, що вищі гармоніки струму та зниження ефективності використання драйвера у режимі зменшення світлового потоку можуть істотно впливати на характер енергоспоживання та спричиняти появу ємнісної реактивної потужності.

На основі отриманих даних сформульовано висновки щодо механізмів виникнення реактивної енергії в подібних системах, а також окреслено потенційні технічні рішення для її компенсації.

Ключові слова: світлодіодне освітлення, реактивна енергія, вимірювання параметрів, вищі гармоніки, регулювання світлового потоку, коефіцієнт активної потужності.

Вступ

У сучасних системах електропостачання все частіше спостерігається зниження якості електроенергії, що проявляється у зменшенні коефіцієнта потужності, збільшенні втрат енергії та порушенні режимів роботи електрообладнання. Одним із чинників, який впливає на ці показники, є широке впровадження світлодіодного освітлення. Незважаючи на його високу енергоефективність, такі джерела світла нерідко створюють додаткове навантаження на мережу у вигляді реактивної потужності, спричиненої як особливостями електронних драйверів, так і гармонічними спотвореннями струму.

На відміну від традиційних ламп розжарювання, LED-світильники мають складну електронну схему живлення, яка часто працює в імпульсному режимі. Це може призводити до виникнення вищих гармонік у струмі, а також до генерації реактивної потужності особливо у випадках, коли драйвер працює в режимі часткового навантаження. Такі явища не тільки знижують загальний коефіцієнт потужності в мережі, а й можуть негативно впливати на роботу іншого обладнання.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю чіткого розуміння механізмів генерації реактивної потужності, пов'язаної зі світлодіодним освітленням, з метою підвищення якості електроенергії та забезпечення стабільної роботи електричних мереж.

1 Мета дослідження

Метою даної роботи є виявлення та аналіз причин виникнення реактивної енергії в системі електропостачання торгових приміщень на основі експериментальних вимірювань електричних параметрів у реальних умовах експлуатації. При цьому особлива увага приділяється оцінці впливу світлодіодного освітлення як основного споживача досліджуваної системи.

На основі аналізу отриманих даних та обробки результатів визначається характер взаємодії LED-світильників з мережею, а також досліджуються типові фактори, що можуть спричиняти зниження коефіцієнта потужності, зокрема: наявність вищих гармонік, що генеруються імпульсними драйверами живлення, а також вплив часткового використання світлового потоку.

© Разінков В. О., 2025

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

2 Матеріали та результати дослідження

Дослідження проводилося на прикладі окремого торгового залу магазину побутової техніки, розташованого в одному з найбільших торгово-розважальних центрів м. Одеса. Попередні дані про виникнення генерації реактивної енергії в мережу було отримано шляхом аналізу даних з електронного лічильника типу NIK, встановленого на ввіді торгового приміщення. Згідно з отриманими даними, протягом усього періоду експлуатації фіксувалася генерація реактивної потужності емнісного характеру, що свідчить про випереджальний характер навантаження.

Електропостачання даного приміщення здійснюється через кабель марки ПВЗ із перерізом однієї жили 95 мм^2 , напругою $0,4 \text{ кВ}$.

З огляду на те, що у торговому центрі функціонує централізована система кондиціонування повітря, основне навантаження в досліджуваному приміщенні формується за рахунок систем освітлення та виставкових зразків побутової техніки. Серед останніх переважають

демонстраційні телевізори, рекламно-інформаційні LED-панелі, мультимедійні вітрини, а також інші електронні пристрої, що використовують імпульсні блоки живлення.

З метою деталізації та візуалізації динаміки генерації реактивної потужності на ввіді до торгового приміщення було встановлено реєстратор електричних параметрів РПМ-416 виробництва ТОВ «НОВАТЕК-Електро», що приєднувався до вторинних кіл трансформаторів струму $200/5$ (рис. 2). Даний пристрій забезпечує багатоканальний моніторинг основних параметрів електричної мережі та дозволяє проводити тривалий запис з високою часовою роздільною здатністю.

До переліку вимірюваних параметрів входили: діюче значення фазної та лінійної напруги, струм у кожній фазі, частота мережі, повний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), активна, реактивна та повна потужність. Зібрані дані були інтегровані з результатами технічного обліку електроенергії приміщення, що дало змогу сформувавши повну картину

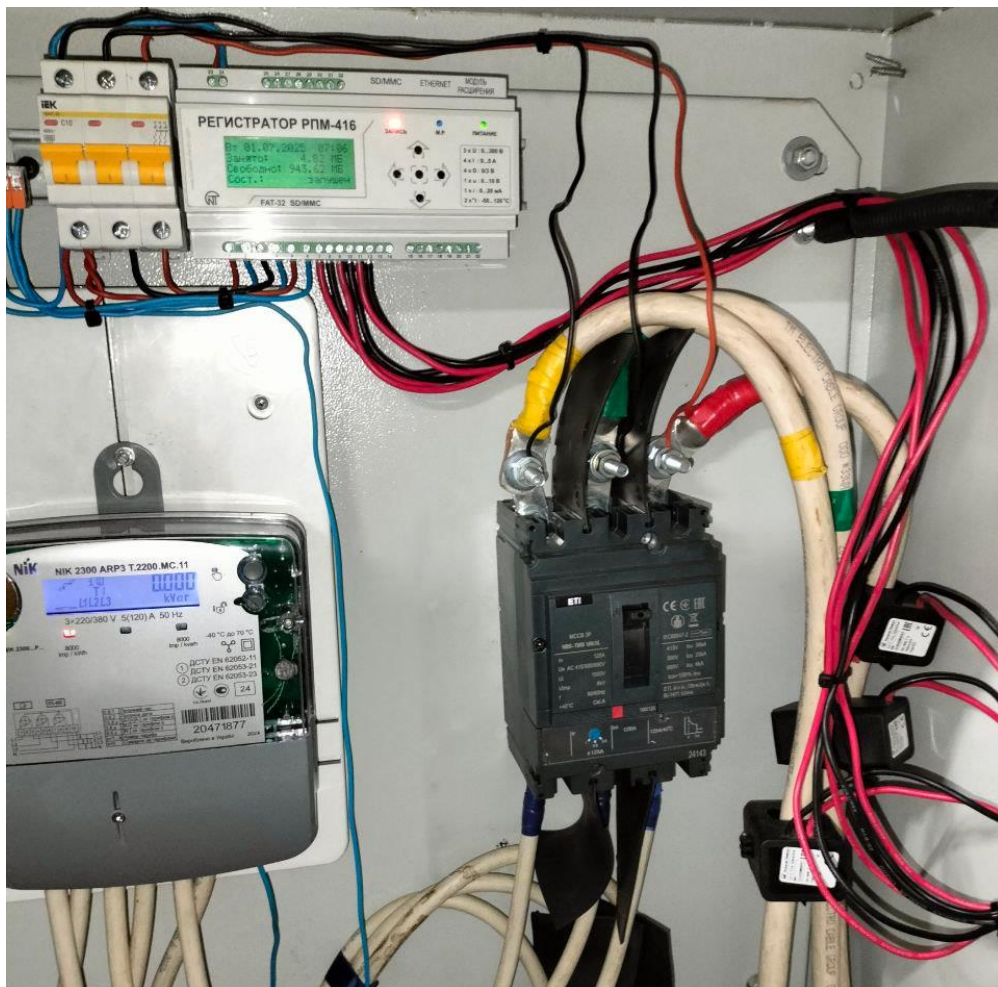


Рис. 1 - Зовнішній вигляд приєднання реєстратора РПМ-416 до вводу торгового приміщення

енергоспоживання як з боку активної, так і реактивної складових. Синхронізація вимірювальних даних дозволила виявити добові та тижневі коливання генерації реактивної потужності, а також встановити зв'язок між змінами навантаження (зокрема в години пік і спаду торгової активності) та параметрами якості електроенергії.

За результатами зчитування інформації з лічильника за допомогою оптопорту було встановлено, що перетікання реактивної енергії

за день в середньому складають 66-69 квар·год при загальному споживанні за день близько 370-385 кВт·год, при цьому споживання реактивної енергії майже не відбувається, за весь період експлуатації було спожито лише 9,77 квар·год реактивної енергії в той час як віддано в мережу 21958 квар·год (рис. 2).

Також для уточнення були зчитані діючі значення струмів та напруги в кожній фазі за допомогою реєстратора РІМ-416 (рис. 3).

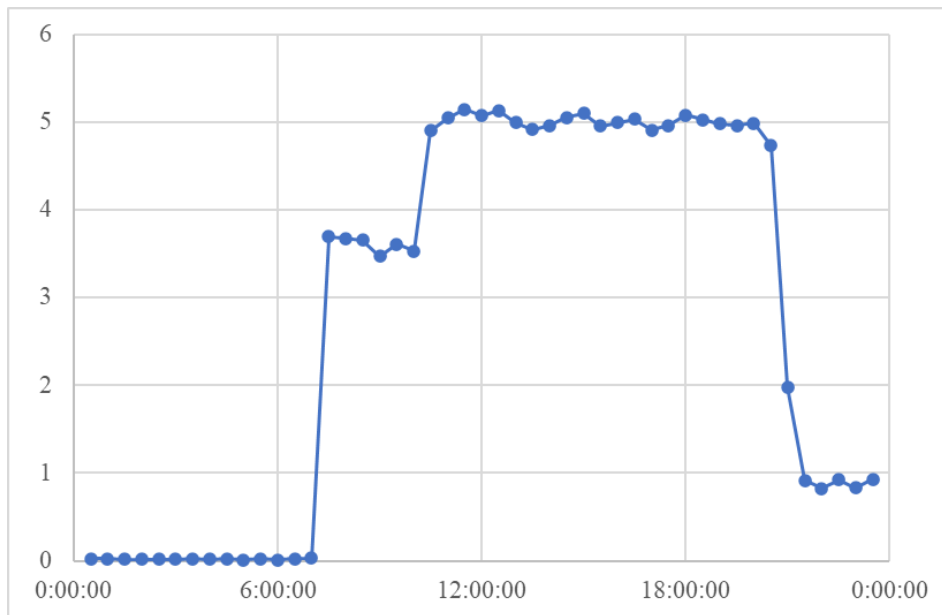


Рис. 2 - Загальний профіль генерації реактивної потужності отриманий з лічильника за одну добу

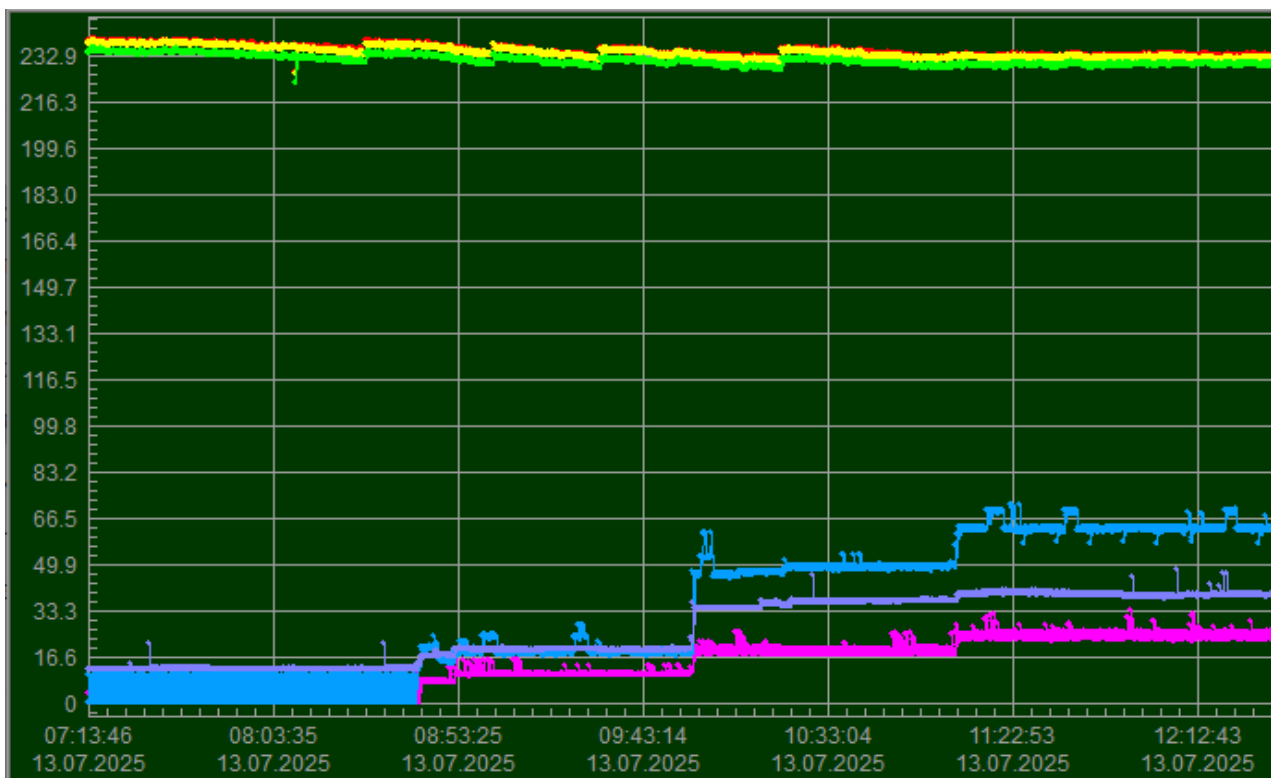


Рис. 3 - Діюче значення струму та напруги в кожній фазі в період початку роботи торговельного залу

На основі результатів аналізу електричних параметрів, представлених на рисунку 2 та 3, встановлено, що протягом усього періоду спостережень, який тривав два тижні, характер електричного навантаження залишався відносно стабільним. Спостерігалася лише незначна варіативність протягом окремих діб. Типовою рисою графіка навантаження був ступінчастий профіль активації споживачів, який чітко

проявлявся у перші години роботи торгового залу.

Графік зміни генерації реактивної потужності, характеризується вираженим ступінчастим характером, що повністю корелює з динамікою зміни струму навантаження в електричній мережі, проте порівняння двох графіків показує що остання ступінь збільшення діючих значень струмів не дає збільшення генерації реактивної потужності.

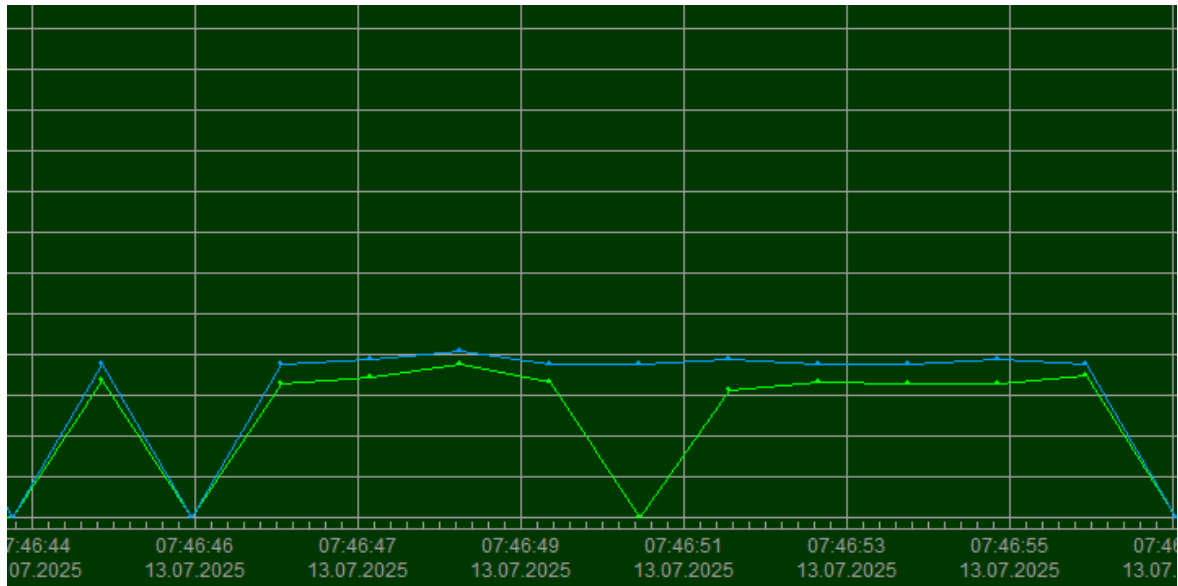


Рис. 4 - Зміна струму та генерованої реактивної потужності приведених в одні координати

З рисунку 4, можна побачити що в періоди до ввімкнення останнього ступеню навантаження кореляція між діючими значеннями струму та реактивної потужності залу навіть у межах коротких часових інтервалів (до кількох секунд), має тісну залежність, що свідчить про пряму залежність режимів роботи ввімкнутих електроустановок на генерацію реактивної потужності.

За запитом було отримано інформацію про те що, відповідно до розкладу роботи даного торговельного залу по годинах вмикаються, світлодіодна підсвітка, освітлення та виставковий екран, і демонстраційні телевізори, ноутбуки та монітори, в нічний час коли магазин не працює в торговельному залі, залишаються ввімкненими аварійне світлодіодне освітлення та світлодіодна підсвітка.

З урахуванням того що генерація реактивної енергії спостерігається і в нічний час, що приведено на рисунку 3, коли залишається включеним лише аварійне освітлення та світлодіодна підсвітка, то особлива увага була приділена саме світлодіодному освітленню. Також відповідно до отриманої інформації та графіку наведеному на рисунку 2 можна зробити

висновок, що демонстраційні ноутбуки, монітори та телевізори не приймають участі в генерації реактивної потужності, оскільки їх ввімкнення не супроводжується всплеском реактивної потужності.

Після обстеження системи освітлення було встановлено, що в торговельному залі в якості основного освітлення встановлено світлодіодні лінійні світильники виробництва ALP, на сайті виробника [1] зазначається що дані світильники мають коефіцієнт активної потужності на рівні 0,95, проте даний коефіцієнт активної потужності не відповідає отриманим виміряним значенням. Схожа проблематика була описана і в статті [2] польських дослідників, які проводили дослідження системи освітлення офісної будівлі. В даній статті зазначається що при вимірюванні навантаження конкретної освітлювальної групи дослідниками було виміряно що при споживанні активної енергії на рівні 14,2 Вт, відбувається генерація реактивної потужності на рівні 21,5 вар. У зроблених висновках авторами зазначається що дане явище виникає через низьку якість освітлювальних приладів та високий загальний коефіцієнт гармонійних спотворень.

Висновок про вплив коефіцієнта гармонійних спотворень на генерацію реактивної потужності виходить з того, що у сучасних освітлювальних системах на основі світлодіодних джерел світла живлення самих світлодіодів здійснюється через електронні драйвери, які містять у своїй структурі випрямлячі та згладжувальні ємнісні елементи. Ці елементи забезпечують стабілізацію напруги та струму, необхідних для живлення світлодіодів. Водночас вони формують ємнісне навантаження на електричну мережу.

У випадку наявності гармонійних спотворень у мережевій нарузі (або струмі), що виникають через роботу нелінійних споживачів, значно ускладнюється режим роботи. Вищі гармоніки (3-тя, 5-та, 7-ма тощо), відіграють помітну роль у формуванні реактивної потужності, оскільки із

зростанням частоти відповідної гармоніки імпеданс зменшується, що, у свою чергу, зумовлює зростання струму на цій частоті. При наявності високочастотних гармонік відбувається інтенсивніше перезаряджання конденсаторів драйвера, тобто збільшується реактивний обмін енергією між джерелом і навантаженням на цих частотах.

Таким чином, чим вищий порядок гармоніки, тим більший внесок вона робить у загальну ємнісну реактивну потужність системи, за умови наявності відповідної амплітуди напруги.

Відповідно до даних отриманих від реєстратора РПМ-416 було визначено, що коефіцієнт гармонійних спотворень (КГС) стрімко зростає при відкритті торгового залу та сягає понад 2,1 в.о.

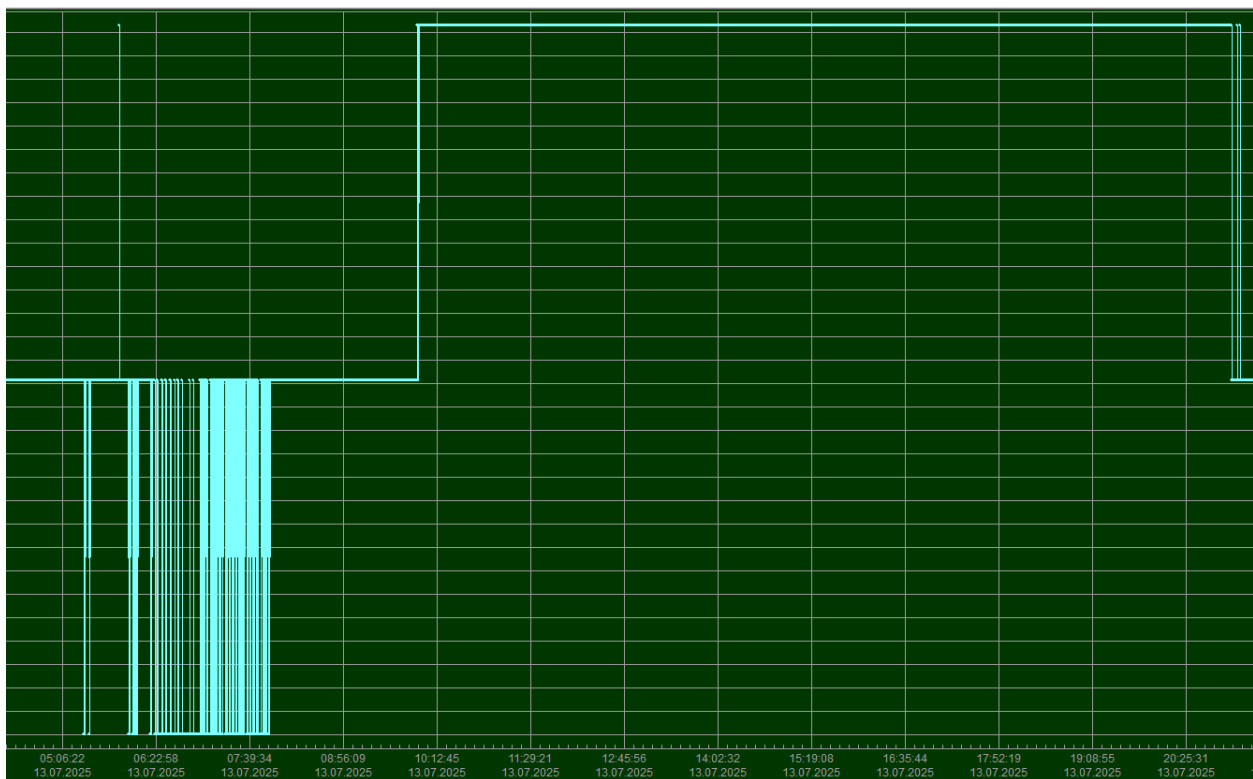


Рис. 5 Зміна коефіцієнта гармонійних спотворень

При таких значеннях КГС реактивна енергія від ємнісного навантаження починає суттєво збільшуватися, проте залежить і від початкового кута зсуву фази. При великому питомому навантаженні від систем світлодіодного освітлення, дана реактивна енергія може суттєво накопичуватися та передаватися до енергосистеми.

В іншій науковій статті [3], яка присвячена питанню компенсації реактивної потужності вуличного світлодіодного освітлення, зазначається, що генерація реактивної потужності в мережу починається в той момент, коли відбувається димерування світлового потоку і

потужність драйвера використовується не на повну потужність. Також зазначається і вплив вищих гармонік на величину генерації реактивної потужності, проте основна увага акцентується на споживаній потужності світильника та наводиться графік зміни параметрів (рис. 6).

З даного графіку можна побачити що коефіцієнт активної потужності зростає зі збільшення споживаної активної потужності, що в свою чергу залежить від напруги, яка регулює світловий потік. Дані висновки зроблені і в наукових працях [4,5].

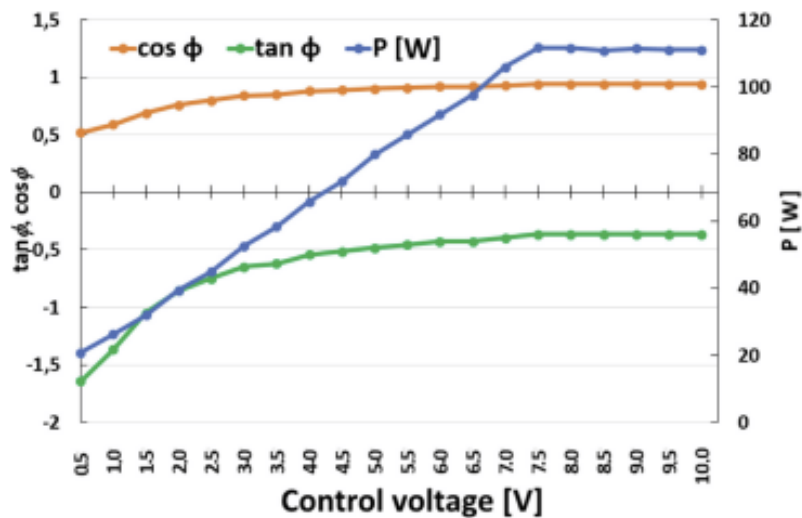


Рис. 6 Графік зміни електричних параметрів світлодіодного освітлення [3]

Висновки

З урахуванням проаналізованих матеріалів наукових статей можна зробити висновки, що для більшості сучасних світлодіодних світильників, регламентується граничний коефіцієнт активної потужності, проте навіть в стандартах ЄС не регламентується який характер (ємнісний чи індуктивний) повинна мати реактивна складова цього освітлення. Серед найбільш вагомих чинників, що впливають на генерацію реактивної енергії в мережу є вищі гармоніки та регулювання світлового потоку. Для розглянутого в статті торговельного залу, найбільший вплив має саме регулювання світлового потоку, оскільки в торговельному залі наявна велика кількість блоків живлення, що працюють з підсвіткою, яка має різні режими в тому числі і режими плавного мерехтіння, що досягається як раз за рахунок димерування. Дана проблематика є актуальною у великих приміщеннях та на відкритих ділянках, де переважна частина навантаження створюється за рахунок освітлення, і де майже відсутнє навантаження що має індуктивний характер. Серед описаних методів усунення даної проблеми в наукових роботах описано різні схеми вмикання в мережу з таким навантаженням дроселів, що створюють індуктивну складову струму, проте в Україні існує проблема з закупівлею таких дроселів, тому основними дієвими та можливими засобами мінімізації негативної дії від таких явищ можуть бути, контроль якості освітлювального обладнання на етапі закупівлі та монтажу такого обладнання, а також розподілення навантаження з урахуванням даної специфіки світлодіодного навантаження.

Список використаної літератури

1. Технічні характеристики та загальна інформація про лінійні світлодіодні світильники Alp Easy Fit Lamp Module 80W 840 Режим доступу: <https://alpgreensolutions.com/nl/product/alp-easy-fit-lamp-module-80w-840-30/> Дата звернення 09.08.2025 р.
2. Wlas, Miroslaw, and Stanislaw Galla. The influence of LED lighting sources on the nature of power factor. *Energies* 11.6 (2018): 1479. <https://doi.org/10.3390/en9120998>
3. Sebastian Ernst, Leszek Kotulski, Tomasz Lerch2, Michal Rad, Adam Sedziwy, and Igor Wojnicki Calculating Reactive Power Compensation for Large-Scale Street Lighting. *Computational Science – ICCS 2020*. 15 June 2020. pp 538–550 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7302807/pdf/978-3-030-50417-5_Chapter_40.pdf
4. Marek Kurkowski, Tomasz Popławski, Maciej Zajkowski and Zbigniew Sołjan. The Impact of Limiting Reactive Power Flows on Active Power Losses in Lighting Installations. *Energies* 2024, 17(16) <https://doi.org/10.3390/en17164072>.
5. Tomasz Lerch, Michał Rad, and Igor Wojnicki. Impact of Dimming LED Street Luminaires on Power Quality. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, 2021, VOL. 67, NO. 2, PP. 255-260. DOI: 10.24425/ijet.2021.135973

References

1. Technical specifications and general information about linear LED luminaires Alp Easy Fit Lamp Module 80W 840 Access mode: <https://alpgreensolutions.com/nl/product/alp-easy-fit-lamp-module-80w-840-30/> Access date 09.08.2025.

2. Wlas, Mirosław, and Stanisław Galla. The influence of LED lighting sources on the nature of power factor. *Energies* 11.6 (2018): 1479. <https://doi.org/10.3390/en9120998>

1. Sebastian Ernst, Leszek Kotulski, Tomasz Lerch², Michał Rad, Adam Sedziwy, and Igor Wojnicki. Calculating Reactive Power Compensation for Large-Scale Street Lighting. *Computational Science – ICCS 2020*. 15 June 2020. pp 538–550. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7302807/pdf/978-3-030-50417-5_Chapter_40.pdf

2. Marek Kurkowski, Tomasz Popławski, Maciej Zajkowski and Zbigniew Sołjan. The Impact of Limiting Reactive Power Flows on Active Power Losses in Lighting Installations. *Energies* 2024, 17(16) <https://doi.org/10.3390/en17164072>.

3. Tomasz Lerch, Michał Rad, and Igor Wojnicki. Impact of Dimming LED Street Luminaires on Power Quality. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, 2021, VOL. 67, NO. 2, PP. 255-260. DOI: 10.24425/ijet.2021.13597

Analysis of the Problem of Reactive Power Generation in Shopping Malls

V. Razinkov

Odesa Polytechnic National University

Abstract. *This study presents the results of a detailed experimental investigation into the power consumption characteristics of a modern shopping center, primarily engaged in retail trade. The main objective was to identify the sources and causes of reactive power generation in the facility's electrical network, with a specific focus on capacitive reactive power, which has been increasingly observed in recent years with the widespread adoption of energy-efficient technologies.*

To achieve this, electrical parameters such as voltage, current, active, reactive, and apparent power were monitored and recorded over a two-week period with 24-hour sampling intervals. This allowed for comprehensive coverage of typical load fluctuations corresponding to daily operational cycles. The collected data were analyzed to detect anomalies and assess the impact of various types of electrical loads.

The results of the analysis revealed a consistent presence of capacitive reactive power in specific areas of the shopping center, especially those dominated by LED lighting systems and electronic equipment powered by pulsed (switched-mode) power supplies. It was determined that the LED luminaires, particularly when operating in partial-load (dimmed) mode or in the presence of harmonic distortions generated by their drivers, were the primary contributors to the observed reactive energy flow.

A literature review was also conducted to support the empirical findings. Scientific publications confirm that the generation of higher-order current harmonics, along with the decreased efficiency and power factor of LED drivers under low-load conditions, significantly contributes to the appearance of capacitive reactive power in such installations. These distortions not only reduce overall power quality but also increase energy losses and may lead to malfunction or reduced service life of sensitive equipment.

Based on the experimental data and theoretical analysis, the study identifies key mechanisms behind the generation of capacitive reactive power and outlines several technical approaches for its mitigation. These include the use of passive inductive compensation devices, improved driver design, and regulatory measures to limit harmonic emissions in commercial electrical systems.

Keywords: *LED lighting, reactive energy, parameter measurement, higher harmonics, luminous flux regulation, active power factor.*

Отримано 22.09.2025



Разінков Владислав Олексійович, доктор філософії, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: razinkov.v.o@opu.ua; тел.: +38 048 705 8512

Razinkov Vladyslav Oleksiiovych, PhD, Senior Teacher of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: razinkov.v.o@opu.ua; ph.: +38 048 705 8512

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0934-0426>