

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІДПРИЄМСТВА

Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, доцент

В. Є. Кривоносов, доктор технічних наук, професор

А. В. Петренко, кандидат технічних наук, доцент

А. В. Іванченко, асистент

О. А. Босенко, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Анотація. Технічний облік споживання енергоресурсів дозволяє знизити витрати на електроенергію та своєчасно керувати перетоками загальної потужності між цеховими технологічними об'єктами, що сприяє збільшенню прибутку підприємства. Впровадження технічного автоматизованого обліку сприяє комплексному контролю режимів споживання енергії, що включає не лише аналіз діяльності підприємства в цілому, а й окремих технологічних вузлів та агрегатів у конкретні години. Це забезпечує можливість формування детальної аналітики щодо ефективності використання енергоресурсів. Зокрема, створення комплексної аналітики дозволяє підприємствам: оцінювати ефективність використання енергії та знижувати витрати на її споживання, визначати точну собівартість продукції залежно від завантаження виробничих ліній, оптимізувати виробничі процеси з урахуванням енергетичних витрат, контролювати рівень споживання реактивної потужності та забезпечувати її ефективну компенсацію.

Автоматизований облік дозволяє підприємствам не лише отримувати фактичні дані про витрати енергоресурсів, а й прогнозувати їх споживання у майбутньому. Це особливо важливо для планування виробничих процесів, зменшення витрат енергії та підвищення загальної енергоефективності. Крім того, автоматизована система обліку сприяє оперативному виявленню та усуненню відхилень у споживанні енергії, що знижує ймовірність перевищення допустимих меж витрат енергоресурсів.

У статті наведено приклад дослідження, яке демонструє ефективність та достовірність технічного обліку на типовому підприємстві. Дослідження також включає аналіз причин похибок у вимірюваннях і пропонує практичні шляхи їх мінімізації.

Таким чином, впровадження сучасних систем технічного автоматизованого обліку є важливим кроком до підвищення енергоефективності, зниження витрат, оптимізації управління потоками потужності між технологічними об'єктами цехів. Завдяки цьому підвищується продуктивність обладнання, покращується

контроль за використанням енергоресурсів і, як наслідок, зростає прибуток підприємства.

Ключові слова: *технічний облік енергоносіїв, реактивна потужність, похибка, трансформатор струму*

Актуальність. Важливою складовою економічного розвитку підприємства є спожита електроенергія. Розвиток технологій у сфері використання електроенергії сприяє підвищенню точності її вимірювання. Це пояснюється тим, що Європейська комісія нещодавно запровадила директиви щодо підвищення ефективності використання електроенергії, а ефективний зв'язок між виробником та споживачем електроенергії стає все більш важливим

Одним з головних напрямків підвищення енергоефективності підприємства є зниження втрат електричної енергії, що сприяє зниженню собівартості продукції [1, 2]. На сучасному підприємстві це завдання вирішує енергоменеджмент з автоматизацією даних технічного обліку електроенергії. Технічний облік споживання енергоресурсів дозволяє знизити витрати на електроенергію, своєчасно керувати перетоками загальної потужності між цеховими технологічними об'єктами, що сприяє збільшенню прибутку підприємства. Впровадження технічного автоматизованого обліку забезпечує: контроль режимів споживання, як підприємства в цілому, так і окремих вузлів та агрегатів в окремі години, створення комплексної аналітики ефективного використання енергоресурсів, деталізований розрахунок собівартості продукції по лініях виробництва в залежності від завантаження та оптимізації енергоресурсів, контроль споживання реактивної потужності та її ефективну компенсацію. Таким чином, повна автоматизація обліку енергоресурсів дозволяє не тільки заощадити енергоресурси, а й спрогнозувати їх витрати.

Технічний облік енергоресурсів ґрунтується на сучасних приладах, до яких відносяться цифрові лічильники та трансформатори струму. Не коректний вибір елементної бази технічного обліку, не врахування особливості виникнення похибки вимірювання функціональних параметрів призводить до отримання не достовірних даних та не правомірних прийнятих рішень, що підвищує собівартість продукції.

Своєчасний аудит роботи технічного обліку є актуальним питанням сьогодення та є гарантом забезпечення вірних рішень по керуванню технологічними процесами, якістю продукції та зниженню собівартості продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [3] авторами розглянуті питання про впровадження автоматичної системи комерційного обліку електричної енергії, яке дозволяє: в реальному масштабі часу контролювати характеристики режимів електропостачання підприємства; здійснювати аналіз режимів електроспоживання з метою виявлення та наступного зменшення (усунення) втрат та непродуктивних витрат електроенергії, що призводить до зниження енергоємності продукції, і відповідно, до підвищення її конкурентоздатності; зменшити витрати підприємства на електроенергетичні ресурси без зниження рівня електроспоживання за рахунок вибору оптимальних тарифів під час розрахунків за електричну енергію; здійснювати керування режимами електроспоживання з метою оптимізації витрат на електричну енергію за найнижчими тарифними коефіцієнтами. У статті не розглянуте питання відсутності базової концепції оцінки вимірювального середовища автоматичної системи комерційного обліку електричної енергії.

У роботі [4] проаналізовано проблему обліку електроенергії при порушенні симетрії навантаження та виникненні несинусоїдальних режимів у трифазних системах електропостачання мереж міст з нелінійними параметрами електроустаткування, як наслідок, завищення при наявності несиметрії та нелінійності навантажень оплати за спожиту електроенергію. Доведено, що облік електроенергії в колах з несинусоїдальними режимами залежить від результативності похибки обліку електроенергії індуктивними лічильниками. Встановлено, що найбільшою мірою вплив несинусоїдальності на сумарну похибку таких лічильників проявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік. Підкреслено, що розрахунок електроенергії в схемах несинусоїдального режиму залежить від результату похибки розрахунку електроенергії, здійсненого індукційними лічильниками.. Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є встановлення

сучасного електронного коректора живлення, в якому схемо-технічні рішення перетворюють нелінійні функціональні параметри в лінійні.

У роботі [5] доведено, що трансформатор струму (ТС) є одним із пристроїв, який відповідає за перетворення рівнів струму та за достовірність вимірювання. Точність такого перетворення сильно залежить від магнітних властивостей матеріалу, з якого виготовлено магнітопроводи ТС. Проведено аналіз двох видів похибок – кутову та амплітудну. Доведено, що невірний вибір принцип роботи ТС суттєво впливає на достовірність вимірювання.

У роботі авторів [6] об'єктом дослідження є трифазний комерційний вузол обліку електроенергії для електричних мереж 380 В. Невизначеність вимірювання електроенергії в режимі зниженого навантаження оцінюється відносним відхиленням активної енергії, вимірюваної вузлом обліку, від фактичного значення. Результати математичного моделювання оцінки невизначеності вимірювань дозволяє оцінити рівень заниження та уточнити енергетичні втрати на підприємстві.

У роботі [7] розглянуто питання достовірності вимірювання струму при споживанні електроенергії споживачами з нелінійними характеристиками. Споживаний електричний струм містить вищі гармоніки, які впливають на точність вимірювання. Згідно директиви EED, індуктивні лічильники повинні бути замінені електронними лічильниками. Це дозволить створити інтелектуальну мережу Smart Grid, що дасть можливість двостороннього зв'язку між комп'ютерною системою постачальника електроенергії та лічильником споживача.

Аналіз відомих джерел дослідження точності вимірювання електричної енергії на промислових підприємствах доводить актуальність проведення енергетичного аудиту на підприємстві.

Мета дослідження - аналіз достовірності вимірювальних параметрів системи технічного обліку електроенергії.

Матеріали і методи дослідження. Електричні методи вимірювання показників активної та реактивної потужностей проводились за допомогою аналізатора якості електроенергії Circutor CIR-E3 AUDITOR.

На рис.1 приведено схему під'єднання аналізатора якості Circutor CIR-E3 AUDITOR на вводі у РП 0,4 кВ



Рис. 1. Схема під'єднання аналізатора якості Circutor CIR-E3 AUDITOR на вводі у РП 0,4 кВ

На рис.2 представлено типову однолінійну схему електропостачання двохтрансформаторної підстанції напругою 10 кВ.

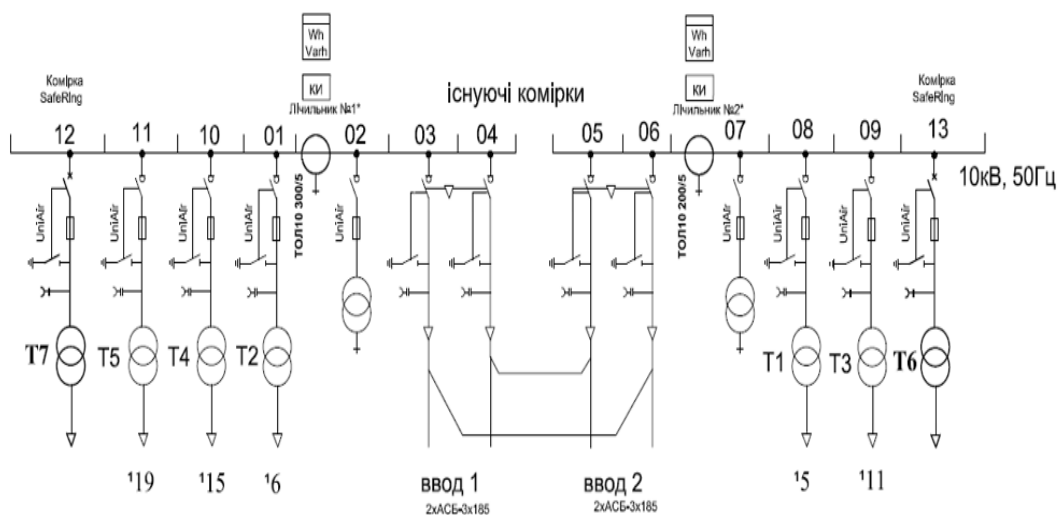


Рис. 2. Однолінійна схема електропостачання підприємства середньої напруги 10 кВ з точкою балансового розподілу та комерційним обліком

На рис.3 представлено однолінійну схему електропостачання промислових цехів з впровадженням технічним обліком на стороні низької напруги 0,38 кВ.

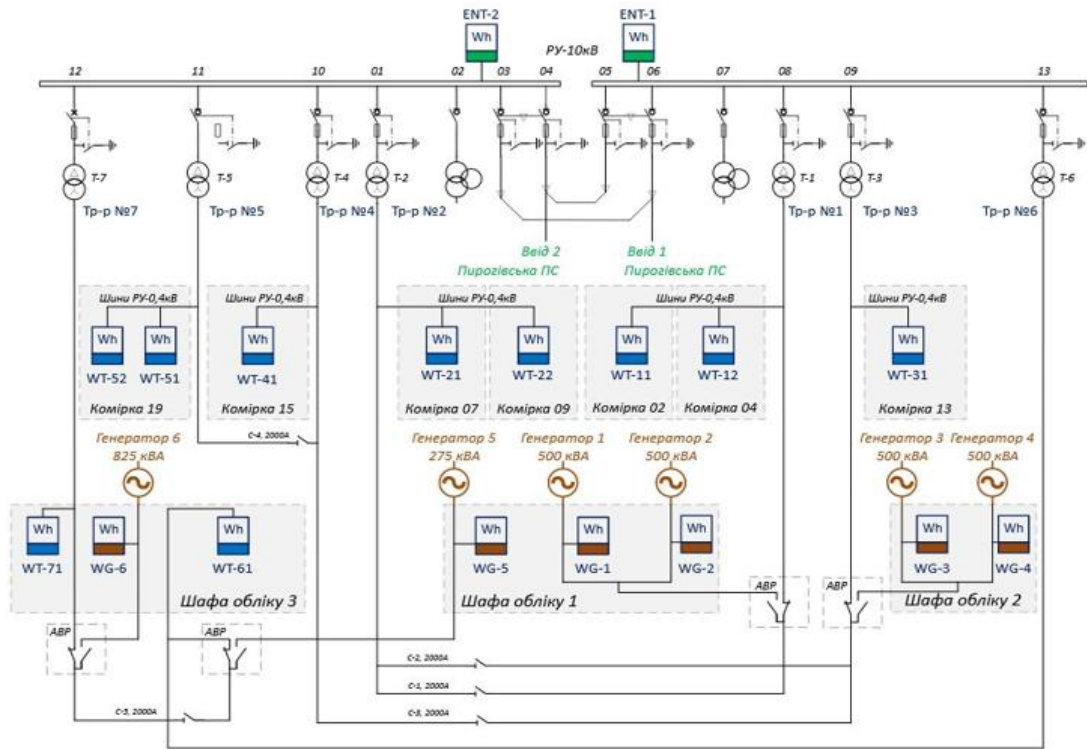


Рис. 3. Однолінійна схема електропостачання промислових цехів підприємства з впровадженням технічним обліком на стороні низької напруги 0,38 кВ.

Результати досліджень та їх обговорення. Технічний облік на підприємстві здійснюється електролічильниками виробництва "Itron" (Франція) SL 7000 5(10)A/5(120)A, трифазний (3x57.7/100 вольт - 3x277/480 вольт), тип підключення універсальний/комбінований (як прямого, так і трансформаторного). Електролічильники вимірюють активну та реактивну енергії в двох напрямках, в трифазних 3-х і 4-х провідних мережах змінного струму промислової частоти в багатотарифних режимах (за добовими зонами), обчислюють повну потужність і коефіцієнт потужності, реєструють результати вимірювань і обчислень, виконують функції моніторингу сили струму, напруги, частоти та інших величин, а також використовуються в складі автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ).

Порівняльний аналіз вимірювання спожитої активної та реактивної енергії провели на підстанціях ТП 3, ТП 5, ТП 7, ТП 4, ТП 6.

Результати дослідження добового використання активної та реактивної електроенергії на ТП 3 представлені на рис. 4 та рис. 5.

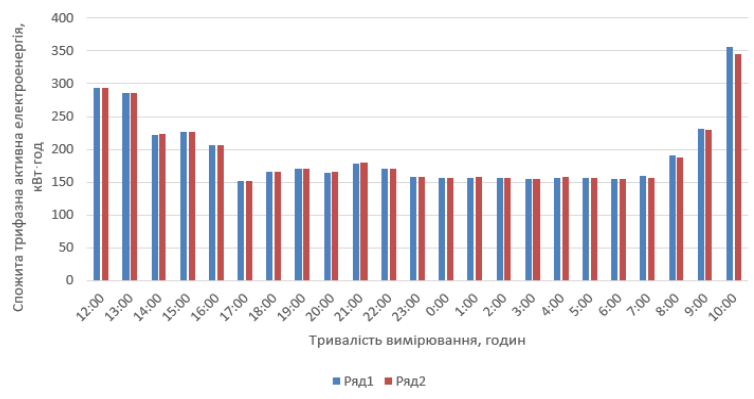


Рис. 4. Гістограма добового використання активної електроенергії на ТП 3. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

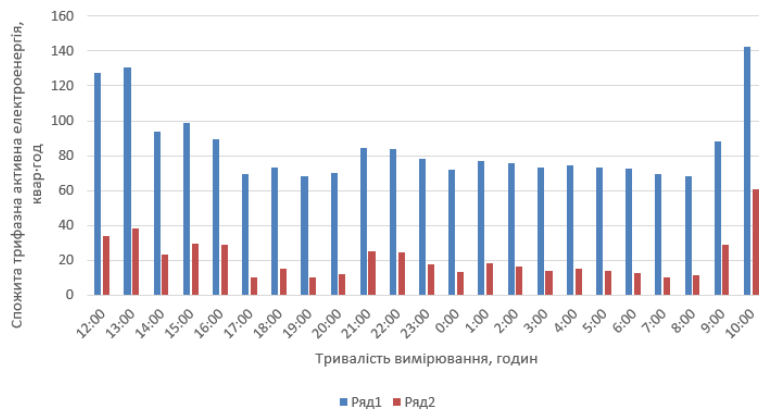


Рис. 5. Гістограма добового використання реактивної електроенергії на ТП 3. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

Результати дослідження добового використання активної та реактивної електроенергії на ТП 4 представлені на рис. 6 та рис. 7.

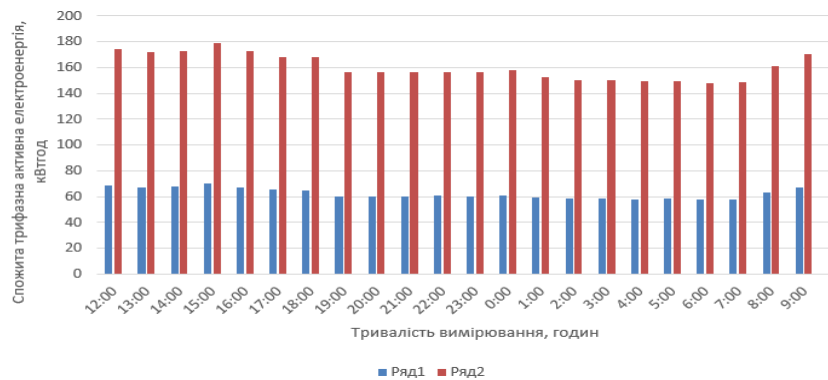


Рис. 6. Гістограма добового використання активної електроенергії на ТП 4. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

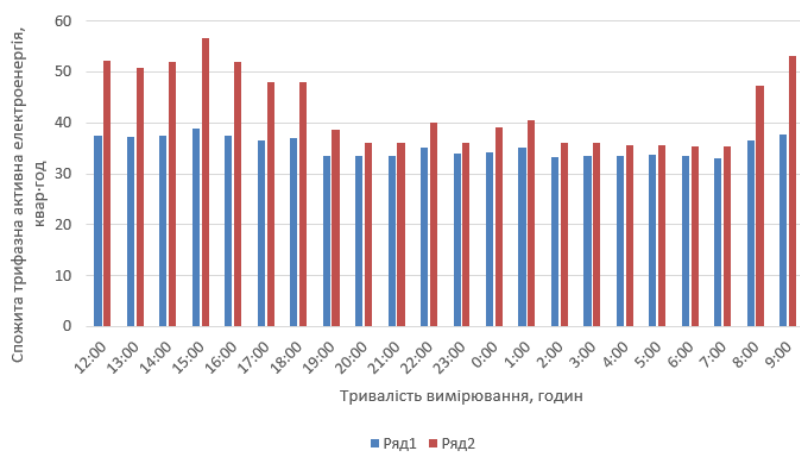


Рис. 7. Гістограма добового використання реактивної електроенергії на ТП 4. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

Результати дослідження добового використання активної та реактивної електроенергії на ТП 5 представлені на рис. 8 та рис. 9.

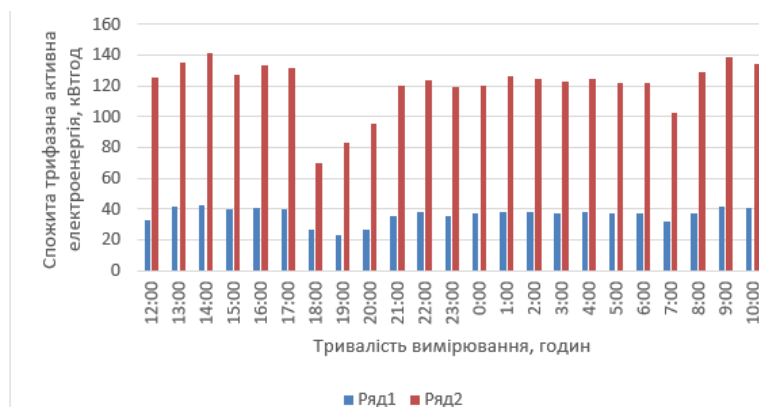


Рис. 8. Гістограма добового використання активної електроенергії на ТП 5. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR



Рис. 9. Гістограма добового використання реактивної електроенергії на ТП 5. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

Результати дослідження добового використання активної та реактивної електроенергії на ТП 6 представлені на рис. 10 та рис. 11.

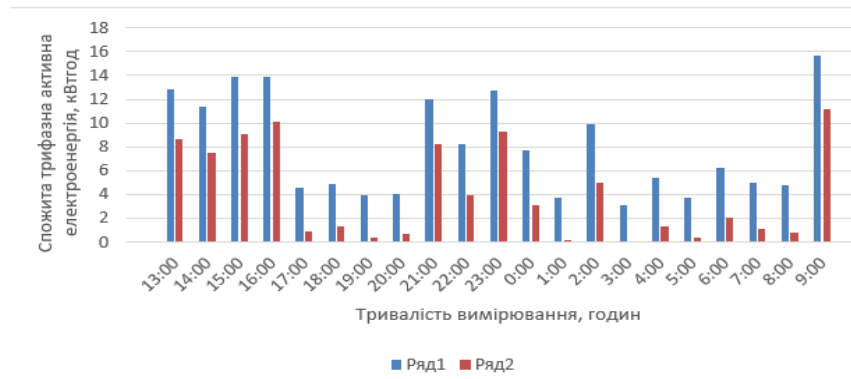


Рис. 10. Гістограма добового використання активної електроенергії на ТП 6 . Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

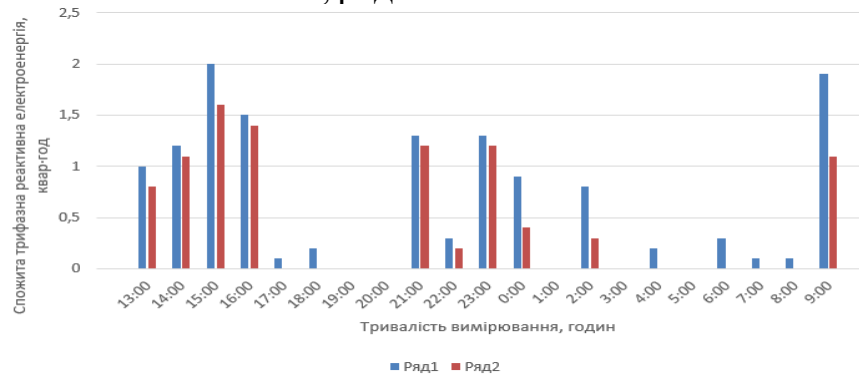


Рис. 11. Гістограма добового використання реактивної електроенергії на ТП 5. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

Результати дослідження добового використання активної та реактивної електроенергії на ТП 7 рис. 12 та рис. 13.

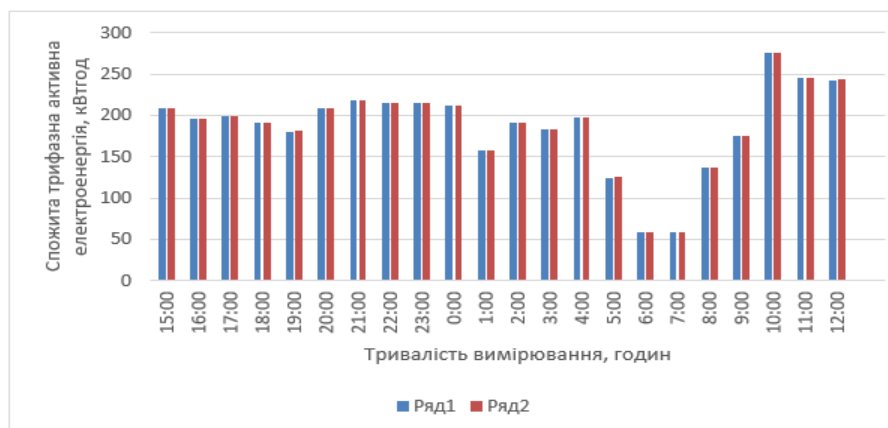


Рис. 12. Гістограма добового використання активної електроенергії на ТП 7 . Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

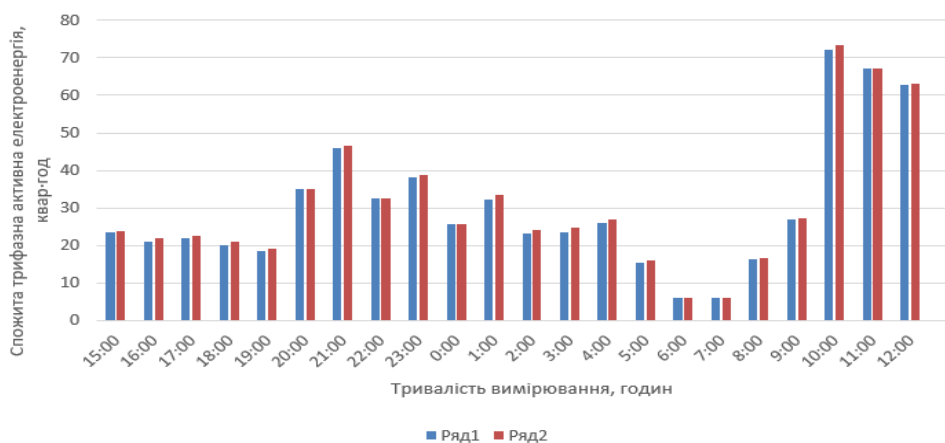


Рис.13. Гістограма добового використання реактивної електроенергії на ТП 7. Ряд 1 – показники Itron SL7000 smart; ряд 2 – показники Circutor CIR-E3 AUDITOR

У табл. 1, наведені результати аналізу гістограм, наведених на рис. 4–13.

1. Результати аналізу вимірювань

№\№	Відносна похибка лічильників активної потужності, δ_P %	Відносна похибка лічильників реактивної потужності, $\Delta\delta_Q$ %	Недоврахування коштів за витрачену активну енергію за добу кВт/год, гривень	Недоврахування коштів за витрачену реактивну енергію за добу кВт/год, гривень
ТП 3	0,0455	57-67 %	Розбіг відсутній	162,2
ТП 4	15- 60 %	5-45 %	2152,0	17,8
ТП 5	30-61,7%	26-63 %	1936,2	47,9
ТП 6	26-80%	6-90%	82,5	13,8
ТП 7	До 0,9%	До 4,5 %	Розбіг відсутній	Розбіг відсутній

Дані, наведені в табл. 1, свідчать, що комерційний облік, який здійснюється на підстанціях ТП 3, ТП 4, ТП 5 та ТП 6 - недостовірний. Недостовірність комерційного обліку призводить до невірних показників питомої вартості кінцевого продукту цеха на одиницю витраченої енергії до 10 %, планування енергетичних лімітів, як в сторону завищення, так і в сторону заниження, помилкове розподілення активної та реактивної потужностей, неможливості проводити заходи з локальної компенсації реактивної потужності та підвищення коефіцієнта корисної дії підприємства в цілому.

За даними статті [8] однією з причини збільшення похибки вимірювання використаної енергії є невірний вибір ТС. При виборі ТС необхідно враховувати величини відносної амплітудної струмової і кутової похибок. Похибки можуть змінювати своє значення та залежать від властивостей сталі трансформатора,

особливостей навантаження в низьковольтній обмотці, появи нелінійної складової та ін. Відносну струмову та кутову похибки за [8] можна визначити за виразом:

$$\Delta\delta I_m = -\frac{I'_{m0}}{I'_1} \sin(\varphi + \alpha_0); \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{I'_{m0}}{I'_1} \cos(\varphi + \alpha_0), \quad (2)$$

де I'_{m0} – струмка намагнічування; I'_1 – приведені значення первинного струму; α_0 – кут зсуву фаз між векторами напруги на вторинній обмотці ТС і струмом навантаження ТС; φ – кут втрат.

Вирази свідчать, що зміни як навантаження ТС, так і первинного струму приводять до збільшення похибки та необхідності проведення вимірювань у зоні нелінійності струмів намагнічування.

Лічильники "Itron" SL 7000 повинні працювати з електронними давачами струму (ЕТС). За [9] ЕТС виконує автоматичну корекцію систематичних похибок вимірювання сигналів: адаптивної і мультиплікативної похибок АЦП, амплітудних і фазових похибок в усталених та перехідних режимах роботи.

Висновки і перспективи. Достовірність технічного обліку сприяє корекції розрахунків лімітів енергоносіїв від 5 % до 15 %.

Впровадження заходів локальної компенсації реактивної потужності дозволить знизити втрати активної потужності до 15 % та заощадити кошти за оплату реактивної потужності.

Зниження похибки вимірювання потребує подальший аналіз режимних параметрів споживання електроенергії та корекцію технічних вимог до сумісної роботи лічильників та трансформаторів струму.

Список використаних джерел

1. Чен Х., Сонг С., Ван Т. Аналіз втрат електроенергії та закону споживання електроенергії в зонах низької напруги: наук. Journal of Physics: Conference Series, 2022 (1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2022/1/012016>.
2. Карр Д., Томсон М. Нетехнічні втрати електроенергії. Енергії, 15 (6), 2218, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15062218>.
3. Коцарь О. В., Мазан В. В. Застосування уніфікованого протоколу передачі даних комерційного обліку електричної енергії в АСКОЕ Головного оператора ОРЕ України. Енергетика та електрифікація. 2005. № 2.

4. Євтух П., Бабюк С., Кислиця Т. Облік електроенергії при несинусоїдальних і несиметричних режимах у мережах електропостачання міст. Вісник ТНТУ. 2013. Т. 70, № 2. С. 183–189.

5. Soinski M., Pluta W., Zurek S. Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, 44(3). <https://doi.org/10.3233/JAE-141790>.

6. Vasylets K., Kvasnikov V., Vasylets S. Refinement of the mathematical model of electrical energy measurement uncertainty in reduced load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 4(8 (118)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262260>.

7. Swieboda C., Leszczynski J. S., Soinski M. Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of nanocrystalline cores. *Measurement*, 2017, Volume 97, Pages 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.024>.

8. Євтух П., Бабюк С. Оцінки похибок джерел сигналів електроенергетичних систем за навантаженням. Вісник ТНТУ. 2011. Т. 16, № 4. С. 178–185.

9. Гречко В. В. Електромагнітні давачі для електронного трансформатора струму. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Київ, 2017.

References

1. Chen, X., Song, C., Wang, T. (2022). Analysis of energy losses and energy consumption law in low-voltage zones. *Journal of Physics: Conference Series*, 1(012016). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2022/1/012016>

2. Carr, D., & Thomson, M. (2022). Non-technical energy losses. *Energies*, 15(6), 2218. <https://doi.org/10.3390/en15062218>

3. Kotsar, O. V., & Mazan, V. V. (2005). Zastosuvannya unifikovanoho protokolu peredachi danykh komertsiiinoho obliku elektrychnoi enerhii v ASKOE Holovnoho operatora ORE Ukrainy [Application of the unified data transfer protocol for commercial electricity metering in the ASCOE of the main operator of ORE of Ukraine]. *Energetika ta Elektrifikatsiya*, 2.

4. Yevtukh, P., Babyuk, S., Kyslytsya, T. (2013). Oblik elektroenerhii pry nesynusoidalnykh i nesymetrychnykh rezhymakh u merezhakh elektropostachannia mist [Energy metering in non-sinusoidal and asymmetrical modes in city power supply networks]. *Visnyk TNTU*, 70(2), 183–189.

5. Soinski, M., Pluta, W., Zurek, S. (2012). Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 44(3). <https://doi.org/10.3233/JAE-141790>

6. Vasylets, K., Kvasnikov, V., Vasylets, S. (2022). Refinement of the mathematical model of electrical energy measurement uncertainty in reduced load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262260>

7. Swieboda, C., Leszczynski, J. S., Soinski, M. (2017). Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of

nanocrystalline cores. Measurement, 97, 38–44.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.024>

8. Yevtukh, P., Babyuk, S. (2011). Otsinky pokhybok dzherel syhnaliv elektroenerhetychnykh system za navantazhenniam [Estimation of errors of signal sources in power systems under load]. Visnyk TNTU, 16(4), 178–185.

9. Grechko, V. V. (2017). Elektromahnitni davachi dlia elektronnoho transformatora strumu [Electromagnetic sensors for electronic current transformers] (Doctoral dissertation). Kyiv.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF TECHNICAL ELECTRICITY METERING AT AN ENTERPRISE

I. Antypov, V. Kryvonosov, A. Petrenko, A. Ivanchenko, O. Bosenko

Abstract. *Technical metering of energy consumption enables enterprises to reduce electricity costs and manage power flows between workshop technological objects in a timely manner, contributing to increased profitability. The implementation of automated technical metering facilitates comprehensive monitoring of energy consumption modes, which includes analyzing not only the overall performance of the enterprise but also the operation of individual technological units and equipment during specific time periods. This approach allows the generation of detailed analytics regarding the efficiency of energy resource utilization. Creating such comprehensive analytics enables enterprises to evaluate energy efficiency and reduce consumption costs, determine the precise cost of production depending on production line load, optimize production processes considering energy expenditures, monitor reactive power consumption, and ensure its effective compensation.*

Automated metering allows enterprises to not only collect actual data on energy resource consumption but also forecast future consumption. This is particularly important for planning production processes, minimizing energy losses, and improving overall energy efficiency. Moreover, automated metering systems enable the timely detection and elimination of deviations in energy consumption, reducing the likelihood of exceeding permissible energy resource usage limits.

The article presents a case study that demonstrates the efficiency and reliability of technical metering at a typical enterprise. The study also includes an analysis of the causes of measurement errors and provides practical recommendations for their minimization.

Therefore, the implementation of modern automated technical metering systems is an essential step toward improving energy efficiency, reducing costs, and optimizing the management of power flows between workshop technological objects. This, in turn, enhances equipment productivity, improves control over energy resource utilization, and ultimately increases enterprise profitability.

Key words: *technical metering of energy resources, reactive power, measurement error, current transformer*