

industry. The results of the analysis of the electrical balance and the use of statistical analysis methods, in particular the regression approach, confirm that productivity is the main factor that determines the level of electricity consumption.

The proposed mathematical model makes it possible to effectively forecast electricity consumption based on equipment parameters. Graphical comparison of actual and calculated indicators confirms the accuracy of the model and its possible use for optimizing energy efficiency at industrial facilities.

electricity consumption model, compressor station, industrial facility, regression analysis

Одержано (Received) 26.10.2023

Процеженовано (Reviewed) 02.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621.311.1; 621.315.62

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.64-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.64-69)

А.І. Котиш, доц., канд. техн. наук, **В.В. Зінзура**, доц., канд. техн. наук,

Н.Ю. Гарасьова, доц., канд. техн. наук, **І.В. Савеленко**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

О.Ф. Котиш, здобувачка третього рівня вищої освіти

Льотна академія національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна

e-mail: akotysh@gmail.com

Вплив роботи трансформаторів напруги підстанцій 35/10 кВ на похибки системи обліку електроспоживання

Роботу присвячено питанню оптимального функціонування систем обліку електроспоживання в умовах ринкових відносин та пов'язаною з цим проблемою надійного й раціонального використання режимів роботи трансформаторів напруги. Досліджено вплив параметрів силових трансформаторів на роботу системи комерційного обліку електричної енергії при встановленні трансформаторів струму і напруги на різних рівнях напруги. Визначено, що завантаження силового трансформатора та схема включення його обмоток впливає на величину похибки вимірювальних каналів в автоматизованих системах контролю і обліку електроенергії. Проаналізовано можливість організації системи обліку електроспоживання при відсутності трансформаторів напруги на високій стороні підстанції та розраховано можливий недооблік електроенергії у цьому випадку.

система електроспоживання, трансформатор напруги, активна, реактивна електроенергія

Постановка проблеми. В теперішній час надзвичайно важливим стає точний облік електроенергії на всіх етапах її виробництва, передачі та споживання. Існуючі системи обліку електроенергії далеко не завжди відповідають вимогам точності, необхідним у сучасних ринкових умовах. Більшість з них були розроблені десятки років тому, коли електроенергія не розглядалася як товар і точність її обліку приділялася меншою увагою. Нажаль, експлуатаційний персонал суб'єктів оптового і роздрібного ринків електроенергії дотепер не приділяють належної уваги стану електричних ланцюгів струму і напруги, що використовується при вимірюваннях з метою комерційного і технічного обліку. Підтвердженням цьому служать численні спроби пристосувати наявні системи обліку до вимог оптового ринку і збільшити точність вимірювань тільки шляхом установки лічильників підвищеного класу точності, ігноруючи

необхідність проведення ревізії і реконструкції електричних ланцюгів в цілому, включаючи трансформатори струму та напруги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час широко використовуються сучасні автоматизовані системи контролю та обліку електроспоживання (АСКОЕ). Установка АСКОЕ є обов'язковою вимогою відповідно до Закону України "Про ринок електричної енергії" та Кодексу комерційного обліку електричної енергії. Такі системи використовуються для моніторингу, контролю, а також для збору інформації щодо споживання електроенергії в реальному часі [1-3]. У [4] наведені методи вимірювання та інтерпретації результатів моніторингу параметрів АСКОЕ в електроенергетичних системах. В своєму дослідженні автори [5] пропонують застосування штучного інтелекту для стохастичного оцінювання похибки вимірювань в системах електроспоживання.

В роботах [2, 6] для підвищення точності вимірювальних каналів в системах обліку електроенергії запропоновано використання, коректуючих похибок. Подана методика прогнозування помилок в умовах максимальних навантажень в системі енергоспоживання.

Однак в реальних умовах роботи метрологічні характеристики вимірювальних каналів в системах обліку часто перевищують нормативні значення розрахункової похибки, на які автори статті звертають увагу.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення точності вимірювань систем обліку електроенергії.

Виклад основного матеріалу. Згідно [7] облік активної електроенергії має забезпечувати визначення кількості енергії:

- переданої та отриманої іншими країнами та електроенергетичними системами;
- виробленої генераторами електростанцій;
- спожитої на власні та господарські (окремо) потреби електростанцій та підстанцій;
- відпущеної споживачам по лініях, які відходять від шин електростанцій безпосередньо до споживачів;
- переданої іншим електропередавальним організаціям або отриманої від них;
- відпущеної споживачам з електричної мережі;
- відпущеної електростанціями в мережі електропередавальних організацій;
- спожитої споживачами екологічної броні;
- яка надійшла до електричних мереж електропередавальної організації з електричних мереж споживача.

Крім того, облік активної електроенергії в електропередавальній організації має забезпечувати можливість:

- визначення надходження електроенергії до електричних мереж різних класів напруги;
- складання балансів електроенергії;
- визначення втрат електричної енергії в елементах електричної мережі;
- здійснення контролю за дотриманням споживачами заданих ним режимів споживання електроенергії.

Побудова систем обліку в даний час здійснюється, як правило, на межі балансової приналежності електричних мереж підприємств та організацій. Вони можуть реалізовуватись на двох рівнях - "верхньому" та "нижньому". Енергокомпанії при цьому, у ряді випадків, мають можливість списувати свої втрати на споживача, так само як і споживачі на енергопостачальні організації.

У зв'язку з цим специфіка ринку електроенергії висуває на передній план питання забезпечення оперативного контролю за енергоспоживанням, як електропостачальними організаціями, так і споживачами. При цьому сучасний стан розвитку Internet технологій дозволяє зараз говорити про існування потужного швидкісного середовища обміну інформацією, що охопила вже більшу частину різних підприємств та організацій. Останнім вигідно розраховуватися за спожиту електроенергію за "верхнім" рівнем, тобто встановлювати систему обліку на високій стороні підстанцій 35-150/10 кВ, оскільки в цій розрахунковій точці тариф приблизно на 25-30 % нижче [8].

Організація обліку в цьому випадку найчастіше виглядає таким чином (рис. 1). Тобто реально система обліку встановлена на високій стороні понижувальної підстанції, а живлення лічильників, як правило, здійснюється від трансформаторів напруги (ТН) низької сторони 6-10 кВ.

За такої схеми обліку та контролю електроспоживання виникають розбіжності між споживачами та електропостачальними організаціями. З одної сторони організація обліку задовольняє обидві сторони, а з іншого боку внутрішні директиви та інструкції облэнерго не дозволяють реалізацію систем обліку електроспоживання подібним чином, вимагаючи здійснювати живлення лічильників від ТН встановлених на високій стороні підстанції.

Однак у цьому випадку для споживача виникає необхідність у придбанні, монтажі та експлуатації досить дорогого обладнання. Природньо, що при цьому виникають суперечки між організаціями, що доходять до вирішення питання у судових інстанціях.

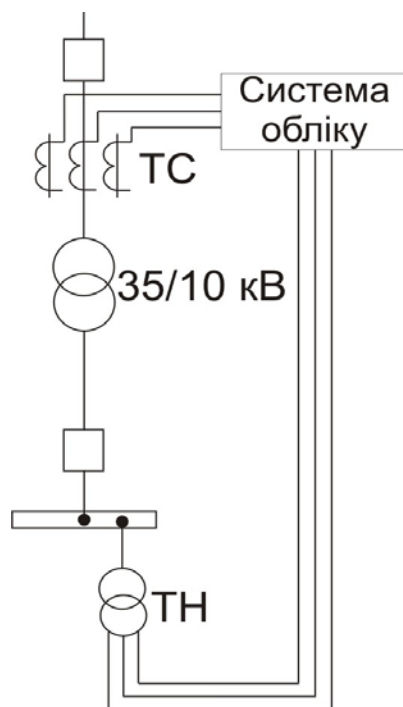


Рисунок 1 – Організація системи обліку на підстанції

Джерело: розроблено авторами

Якщо навіть припустити, що трансформатори струму та напруги в системі обліку ідеальні, тоді для аналізу мережі (рис. 1) доречно використовувати наступну схему заміщення (рис. 2) [9, 10].

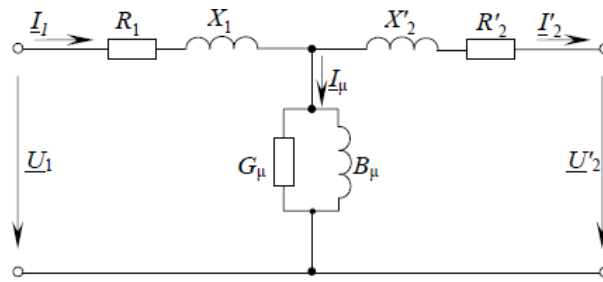


Рисунок 2 – Схема заміщення силового трансформатора

Джерело: розроблено авторами

В даному випадку потужність, що проходить відповідно по високій стороні силового трансформатора та потужність, що вимірюється системою обліку можна записати наступним чином:

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \cdot I_1^* \quad (1)$$

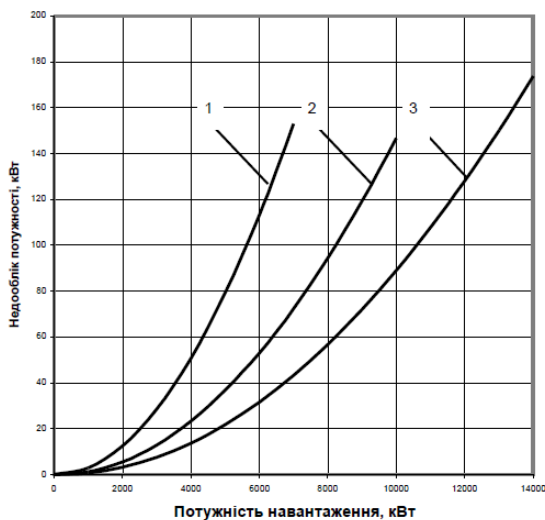
$$\underline{S}_2 = \sqrt{3} \underline{U}'_2 \cdot I_1^* \quad (2)$$

Тоді недооблік потужності знаходимо за виразом:

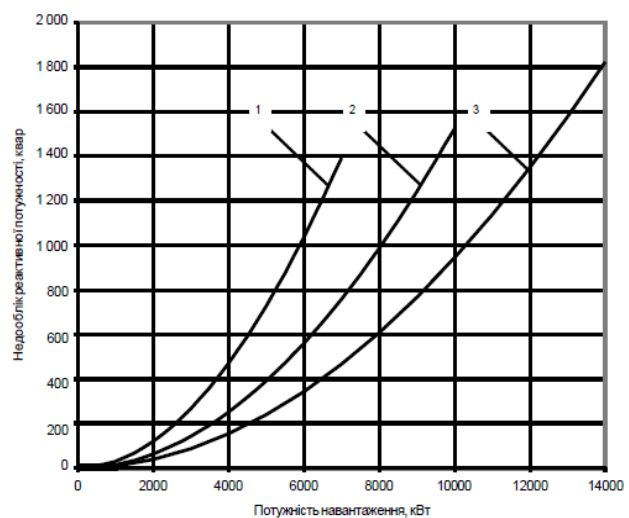
$$\Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \sqrt{3} (\underline{U}_1 - \underline{U}'_2) \cdot I_1^* = \sqrt{3} \Delta \underline{U} \cdot I_1^* \quad (3)$$

Як бачимо з (3) недооблік пропорційний падінню напруги в трансформаторі, яке залежить від потужності навантаження. Крім того, на якість обліку електроенергії впливає схема з'єднання обмоток силового трансформатора, внаслідок зміни кута між струмом та напругою у первинній та вторинній обмотках.

На рис. 3 (а, б) побудовано графіки залежності недообліку активної та реактивної потужності залежно від потужності навантаження. Розрахунок виконаний для найпоширеніших трансформаторів: 1-ТМН-4000/35, 2-ТМН-6300/35 та 3-ТДН-10000/35. Навантаження приймалося чисто активне ($\cos\phi=1$).



а)



б)

Рисунок 3 – Графіки залежності недообліку активної (а) та реактивної (б) потужності в залежності від навантаження

Джерело: розроблено авторами

З наведених залежностей видно, що недооблік зростає пропорційно до потужності навантаження. Причому для реактивної потужності приблизно на порядок більше, ніж для активної.

Висновок. Таким чином формування системи обліку на надстанціях за схемою (рис. 1) неприпустимо, через недооблік активної та реактивної електроенергії. Для оптимального функціонування систем комерційного обліку на “верхньому” рівні необхідна установка ТН на високій стороні підстанції.

Список літератури

1. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку / А.В. Праховник та ін. *Інформаційний бюлетень НКРЕ*. 2002. № 11. С. 230-261.
2. Піщак Ю., Габльовська Н., Кононенко М. Аналіз методів та заходів із забезпечення точності при проведенні вимірювань та обліку автоматизованою системою комерційного обліку (АСКОЕ) в умовах енергоринку України. *Scientific Collection «InterConf»: Theory and Practice of Science: key aspects*. 2021. № 58. С. 235-249.
3. Заєць А. А., Касаткіна І. В. Сучасні пристрої обліку електричної енергії. *Молодь: наука та інновації* : матеріали 10-ої всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених, 23–25 листопада 2022 р. Дніпро : НТУ ДП, 2022. С. 310-311.
4. Liubčuk, V.; Radziukynas, V.; Kairaitis, G.; Naujokaitis, D. Power Quality Monitors Displacement Based on Voltage Sags Propagation Mechanism and Grid Reliability Indexes. *Applied Sciences*. 2023. №13(21). P. 11778. <https://doi.org/10.3390/app132111778>
5. Богданов О.М., Плескач Б.М. Інформаційна технологія моніторингу ефективності енергоспоживання технологічних систем. *Штучний інтелект*. 2019. Вип. 1-2. С. 34-42.
6. Похибки каналів вимірювання в системах обліку електроенергії / Калінчик В. та ін. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 1 (5). С. 58-60.
7. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х. : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
8. Тарифи на електроенергію для підприємств. URL:<https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/>.
9. Загірняк М.В., Невзлін Б. І. Електричні машини: підручник. Київ : Знання, 2009. 399 с.
10. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології». К. : НУХТ, 2010. 366 с.

References

1. Prakhovnyk, A.V. et al. (2002) Kontseptsiia pobudovy avtomatyzovanykh system obliku elektroenerhii v umovakh enerhorynku [Concept of building an automated energy metering system in the market conditions]. *Informatsiyni biuleten NKRE – Information Bulletin of NERC, 11*, 230-261 [in Ukrainian].
2. Pischak, Y., Hablovska, N. & Kononenko, M. (2021) Analiz metodiv ta zakhodiv iz zabezpechennia tochnosti pry provedenni vymiriuvan ta obliku avtomatyzovanoiu systemoiu komertsiihnoho obliku (ASKOE) v umovakh enerhorynku Ukrainy [Analysis of methods and measures to ensure accuracy in measurements and accounting by the automated commercial accounting system (ASCOE) in the conditions of the energy market of Ukraine]. *Scientific Collection «InterConf»: Theory and Practice of Science: key aspects, 58*, 235-249 [in Ukrainian].
3. Zaiets', A. A. & Kasatkina, I. V. (2022). Suchasni prystroi obliku elektrychnoi enerhii [Modern electrical energy metering devices]. Youth: science and innovation: 10-a Vseukrains'ka naukovo-tekhnichna konferentsiia studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh (23–25 lystopada 2022 r.) – 10th All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists (pp. 310-311). Dnipro : NTU DP [in Ukrainian].
4. Liubčuk, V., Radziukynas, V., Kairaitis, G. & Naujokaitis, D. (2023) Power Quality Monitors Displacement Based on Voltage Sags Propagation Mechanism and Grid Reliability Indexes. *Applied Sciences, No.13(21)*, P. 11778. <https://doi.org/10.3390/app132111778> [in English].
5. Bohdanov, O.M. & Pleskach, B.M. (2019). Informatsiina tekhnolohiia monitorynhu efektyvnosti enerhospozhyvannia tekhnolohichnykh system [Information technology for monitoring the efficiency of energy consumption of technological systems]. *Shtuchnyi intelekt – Artificial Intelligence, Vol. 1-2*, 34-42 [in Ukrainian].

6. Kalinchyk, V. et al. (2021). Pokhybky kanaliv vymiriuvannia v systemakh obliku elektroenerhii [Use of Statistical Analysis Methods in Processing Population Survey Data] *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improvement of electric machines and devices. Theory and practice, 1 (5), 58–60* [in Ukrainian].
7. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for arranging electrical installations]* (2017). X. : Vydavnytstvo «Fort» [in Ukrainian].
8. Taryfy na elektroenerhiu dlia pidpriemstv [Electricity tariff for enterprises]. (n.d). *index.minfin.com.ua*. Retrived from <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/> [in Ukrainian].
9. Zahirniak, M.V. & Nevzlin, B. I. (2009). *Elektrychni mashyny [Electric machines]*. Kyiv : Znannia [in Ukrainian].
10. Andriienko, V.M. & Kuievda, V.P. (2010). *Elektrychni mashyny [Electric machines]*. K. : NUKhT [in Ukrainian].

Andrii Kotysh, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Savelenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Olena Kotysh, Holder of the third (educational and scientific)
Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The influence of the operation of voltage transformers of 35/10 kV substations on the errors of the electricity consumption accounting system

The work is devoted to the issue of the optimal functioning of electricity consumption accounting systems in the conditions of market relations and the related problem of reliable and rational use of the operating modes of voltage transformers. The possibility of organizing the electricity consumption accounting system in the absence of voltage transformers on the high side of the substation was analyzed and the possible under-accounting of electricity in this case was calculated.

The influence of the parameters of power transformers on the operation of the commercial electricity accounting system when current and voltage transformers are installed at different voltage levels is studied. It was determined that the loading of the power transformer and the switching scheme of its windings affects the error value of the measuring channels in the automated systems of control and accounting of electricity.

If you use the classic T-shaped transformer replacement scheme, you can get the equation for its full power. After making some mathematical transformations, we get a formula that calculates the underaccounting of electrical energy. As we can see, the shortfall is proportional to the voltage drop in the transformer, which depends on the load power.

According to the constructed dependences of electric energy underaccounting on the load for several types of power transformers (ТМН-4000/35, ТМН-6300/35, ТДН-10000/35), it was found that the underaccounting of electricity increases in proportion to the load. For reactive power, it is about an order of magnitude more than for active power.

Thus, the formation of the accounting system at substations according to the scheme (Fig. 1) is unacceptable, due to the underaccounting of active and reactive electricity. For the optimal functioning of the accounting systems at the "upper" level, it is necessary to install a voltage transformer on the high side of the substation.

power consumption system, voltage transformer, active and reactive electricity

Одержано (Received) 30.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023