

ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ПРОГРАМУВАННЯ

УДК 004.414.2, 681.138.8

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

*Березянський Б.М., асистент,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Вступ. Постановка задачі

В наш час велику роль у роботі підприємства відіграє контроль якості та збереження електроенергії. На підприємство як правило енергія надходить по трьом фазам, умовно позначеним як А,В,С (та нейтраль N) за двома типами з'єднання: зірка та трикутник (із ізольованою нейтраллю) (рис.1.). В подальшому електроенергія розподіляються між підрозділами підприємства [1]. Для моделювання несиметричного трьохфазного процесу



Рис.1. Типи розподілу електроенергії:
а) зірка, б) трикутник

споживання використовується метод симетричних складових: пряма послідовність, зворотня послідовність та послідовність $3I_0$.

Пряма послідовність з'являється тоді, коли процес повністю симетричний

(рис 2.а), тобто сума трьох векторів дорівнює 0, і $|I_A| = |I_B| = |I_C|$, а $\alpha_A = \alpha_B = \alpha_C = 120^\circ$. У випадку, коли три вектори за величиною різні але сума залишається рівною 0, з'являється зворотня послідовність (рис 2.б). Коли сума відмінна від 0 (за реактивного навантаження на одній із фаз), виникає асиметрична складова (рис 2.в).

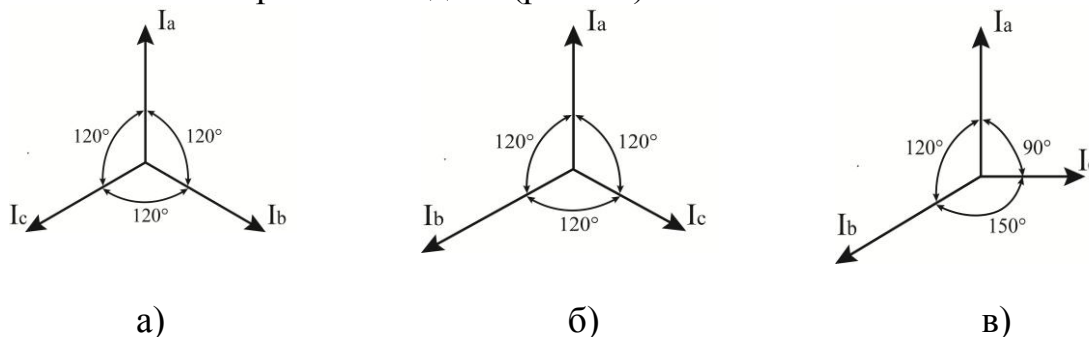


Рис.2. Метод симетричних складових:
а) симетричний процес, б) несиметричний процес, в) процес $3I_0$

Несиметрична складова з'являється при різному навантаженні на фа-

зах А, В, С, тобто при порушенні фазових та амплітудних співвідношень. У випадку зірки наявність асиметрії свідчить про струм у нейтралі (позначений як $3I_0$), у випадку трикутника – про наявність струмів, викликаних порушенням ізоляції. Також у обох випадках відслідковується наявність паразитних ємностей та індуктивностей. Для визначення, на якій саме фазі відбуваються втрати, необхідно визначати діаграму векторів напруг між фазами і нейтраллю $3U_0$, та кути між векторами струму і напруги для відповідної фази (рис. 3.) [2].

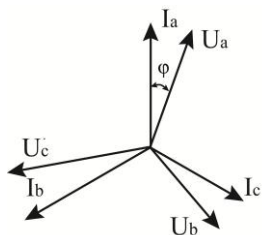


Рис 3. Зміщення векторів напруг відносно струмів на нейтралі; φ - кут між векторами напруги та струму

Симетричність процесу досягається відносно рівномірним розподілом навантаження по трьом фазам.

Для аналізу енергозбереження необхідно досліджувати коефіцієнт потужності, тобто співвідношення між активною та повною потужностями.

$$k_p = P / \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1)$$

де P – активна складова, а Q – реактивна складова потужності.

Із формули (1) видно: чим більше значення k_p наближається до 1, тим менше втрат у енергомережі. Збільшення реактивної складової свідчить про протікання більших струмів через мережу, ніж розраховано. В результаті виділяється теплова енергія, що тягне за собою збільшення поперечного перерізу проводів, по яким електроенергія надходить до підрозділів, та додаткові фінансові витрати.

Окрім проблем енергозбереження та контролю якості існують питання зовнішнього несанкціонованого відбору та внутрішнього несанкціонованого використання енергії, відхилення параметрів електроенергії від нормативних з вини постачальника тощо.

Постановка задачі.

Для визначення джерел цих втрат необхідно вирішити ряд задач сфери контролю споживання електроенергії:

- контролювати значення частоти, фазових напруг і струмів та лінійних напруг електроенергії, що надходить від постачальника;
- контролювати час пікових навантажень на підприємстві;
- відслідковувати наявність активної та реактивної енергії та відповідно потужності, що протікає від підприємства.

Вирішення поставлених задач можливе шляхом розробки автоматизованого програмно-апаратного комплексу дослідження параметрів енерго-

споживання промислового підприємства.

Загальний опис автоматизованого програмно-апаратного комплексу

Для виконання вищезгаданих задач автором розроблена автоматизована система контролю та обліку за витратами електроенергії (АСКОЕ) «РПС-Дніпро», призначена для зчитування, обліку та аналізу даних з витрат електроенергії за трьома фазами. На рис. 4 наведена структурна схема АСКОЕ [3].

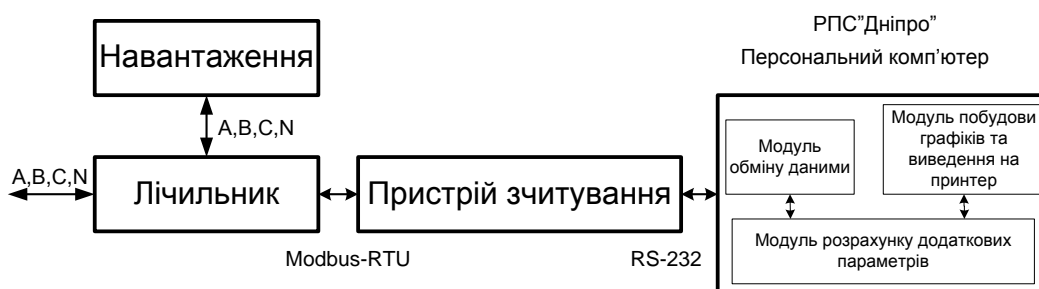


Рис.4. Система зчитування показників витрат електроенергії

На вході енергосистеми підприємства ставиться лічильники класу точності 0.5 [4,5], що ведуть облік наступних характеристик:

- параметри фазових напруг та струмів, що підтверджували б допустимі значення;
- значення активної та реактивної складової енергій для кожної фази в прямому напрямку для контролю споживання електроенергії;
- значення активної та реактивної складової енергій для кожної фази в зворотному напрямку для контролю несанкціонованого відбору енергії;
- частоти в мережі.

Лічильник та пристрій зчитування перед установкою проходять відповідний метрологічний контроль.

За допомогою пристрою зчитування (ПЗ) дані про енергію надходять на персональний комп'ютер (ПК). Зчитування з ПЗ відбувається по інтерфейсу RS-232 (СОМ-порт). В основі обміну даними між лічильником та пристроєм зчитування використовується протокол Modbus-RTU [6].

Важливою частиною системи «РПС-Дніпро» є програмне забезпечення. Воно складається із:

- програмного ядра керування мікроконтролером лічильника (ПЯМЛ);
- програмного ядра керування мікроконтролером ПЗ (ПЯПЗ);
- програмного комплексу оброблення даних на ПК.

ПЯМЛ проводить облік миттєвих значень струмів та напруг з лінії по фазам А, В, С через кожні 5с, за отриманими значеннями розраховуються значення активних та реактивних значень енергій у прямому та зворотньому напрямку. ПЯПЗ призначено для організації обміну даними між лічильником та персональним комп'ютером. Як тільки надходить запит від ПК на зчитування даних, програмне ядро генерує переривання – спеціальну команду для лічильника, і той передає весь блок накопичених даних.

Головні завдання програмного комплексу АСКОЕ:

- організація зчитування накопичених даних з лічильника;
- очищення пам'яті зчитуючого пристрою;
- розрахунок необхідних додаткових параметрів;
- запис даних у файл та виведення інформації на паперові носії;
- побудова графіків параметрів електроспоживання.

Програмний комплекс може бути встановлено як на стаціонарний комп'ютер, так і ноутбук, під операційну систему Windows XP.

Теоретична частина

Дані про параметри енергоспоживання надходять порціями по 93 байт. До однієї порції інформації входять дані щодо номеру пристрою, дати та часу фіксації показників, значень активної, реактивної енергії на трьох фазах у двох напрямках, сумарної по трьом фазам активної та реактивної енергії, значень фазних напруг і струмів на трьох фазах та частоти сигналу у мережі. У кінці додається контрольна сума, яка підтверджує коректність передачі блоку даних. За отриманими значеннями напруг проводиться розрахунок лінійних напруг між трьома фазами за формулами [1,2]:

$$\begin{aligned}U_{AB} &= \sqrt{U_A^2 + U_B^2 - 2U_A U_B \cos(120^\circ)}, \\U_{BC} &= \sqrt{U_B^2 + U_C^2 - 2U_B U_C \cos(120^\circ)}, \\U_{CA} &= \sqrt{U_C^2 + U_A^2 - 2U_C U_A \cos(120^\circ)},\end{aligned}\quad (2)$$

де U_A, U_B, U_C - фазові напруги, кут між векторами напруг (120°) формується постачальником.

За отриманими з лічильника значеннями енергії розраховується активна P та реактивна Q складові потужності за інтервал $\Delta t = 5$ с:

$$P = (E_{P2} - E_{P1}) / \Delta t, \quad (3)$$

$$Q = (E_{Q2} - E_{Q1}) / \Delta t, \quad (4)$$

де E_{P2}, E_{Q2} - значення відповідно активної та реактивної складових енергії в поточний момент часу t_2 ; E_{P1}, E_{Q1} - значення відповідно активної та реактивної складових енергії в попередній момент часу t_1 , Δt - проміжок часу між вимірами.

Коефіцієнт потужності k_p для кожної фази та струм $3I_0$ розраховуються за формулами (1) та (5) відповідно.

$$3I_0 = \sqrt{I_P + I_Q} \quad (5)$$

$$I_P = (I_A \cos(k_{PA}) + I_B \cos(k_{PB} - \frac{2\pi}{3}) + I_C \cos(k_{PC} + \frac{2\pi}{3}))^2,$$

$$I_Q = (I_A \sin(k_{PA}) + I_B \sin(k_{PB} - \frac{2\pi}{3}) + I_C \sin(k_{PC} + \frac{2\pi}{3}))^2,$$

де I_A, I_B, I_C , - фазові струми, k_{PA}, k_{PB}, k_{PC} - коефіцієнти потужності для

фаз А, В, С відповідно.

Результати експериментального дослідження

АСКОЕ пройшла тестове випробування на стенді із трьома фазами, що дало можливість відслідковувати зміну фазового кута між напругою та струмом на кожній фазі, зміну розрахункових параметрів при відключенні від електромережі однієї чи двох фаз. Також «РПС-Дніпро» було випробувано із реальною мережею навантаження (офіс). Програмний комплекс відслідковував не тільки поточні показники, але і «стрибки» напруги при ввімкненні електронагрівача пристрою.

Умови дослідження. Період між точками встановлюється 5с, і з таким інтервалом розраховується протягом доби. Типом подачі електроенергії - «зірка». Граничні значення часу – з 09:21 до 23:21. Вимірювання було проведене 20 квітня 2011 року.

Результати дослідження. За отриманими результатами побудовані графіки наведені на рис 5-9, які відображають динаміку енергоспоживання в часі. При побудові миттєві значення усереднювались для інтервалів часу 20 хв., що дозволяє найбільш оптимально відобразити інформацію на графіках. На рис. 5 - 6 наведені залежності лінійних напруг та фазових струмів від часу.

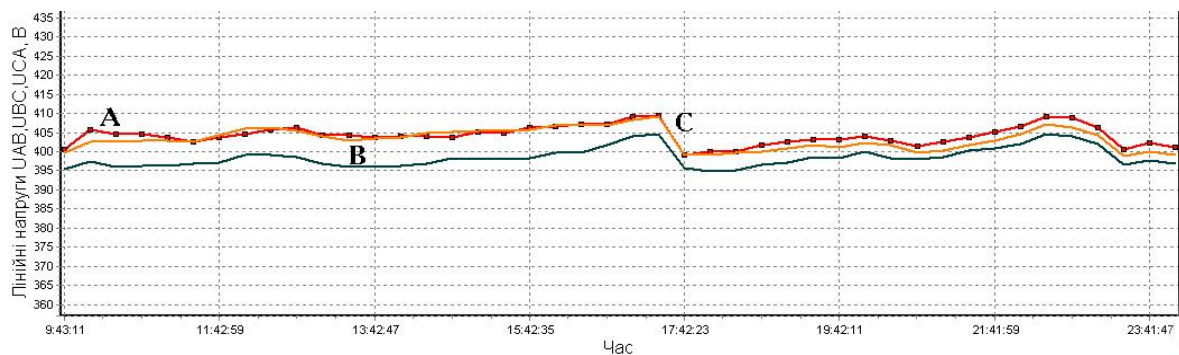


Рис. 5. Графіки лінійних напруг

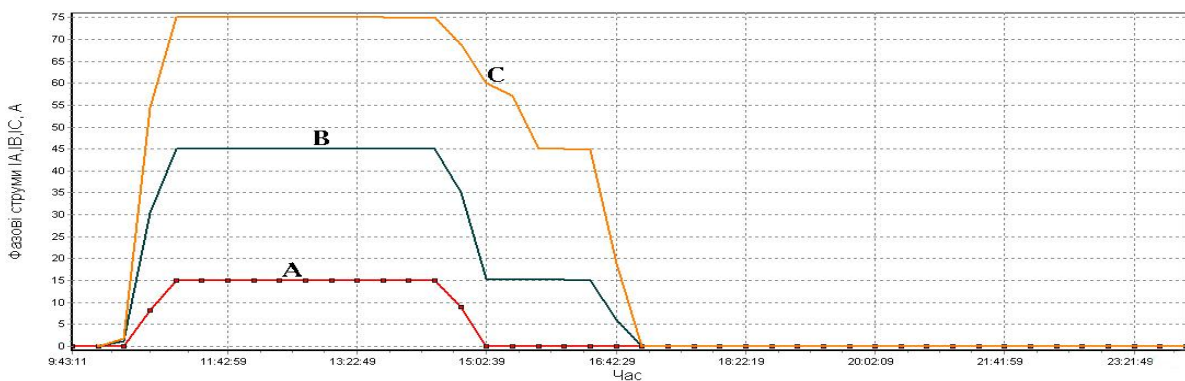


Рис. 6. Графіки фазових струмів

Як видно з рис 6., основний час навантаження у піддослідному об'єкті

припав на період орієнтовно із 10:00 по 17:00. Максимальне навантаження розподілене на фазу С, найменш навантажена – фаза А. Відхилення значень лінійних напруг знаходяться в межах норми $380\text{В}\pm 10\%$ [7], а отже і для фазових напруг - $220\text{В}\pm 10\%$, проте в цілому вони завищені порівняно із нормативним значенням (рис.5). На рис. 7 наведена залежність споживаної активної потужності від часу.



Рис. 7. Графіки активної додатної потужності для трьох фаз

З рис.7. видно, що максимальна споживана потужність підприємства досягла 14кВт на фазі С за денний період. Наявність на графіку невеликих значень (на рівні 1кВт) після 17:30, за відсутності струму пояснюється недостатньою розрядністю отримуваних значень фазового струму на лічильнику (один знак після коми в той час як в реальності є значення із другим знаком після коми, тобто на рівні сотих значень Ампер). Реактивна додатна потужність за період вимірювання не відхилялась від нульового значення, отже в системі відсутні джерела генерування струму – немає несанкціонованого відбору електроенергії. На рис. 8 наведена залежність реактивної від'ємної потужності від часу.

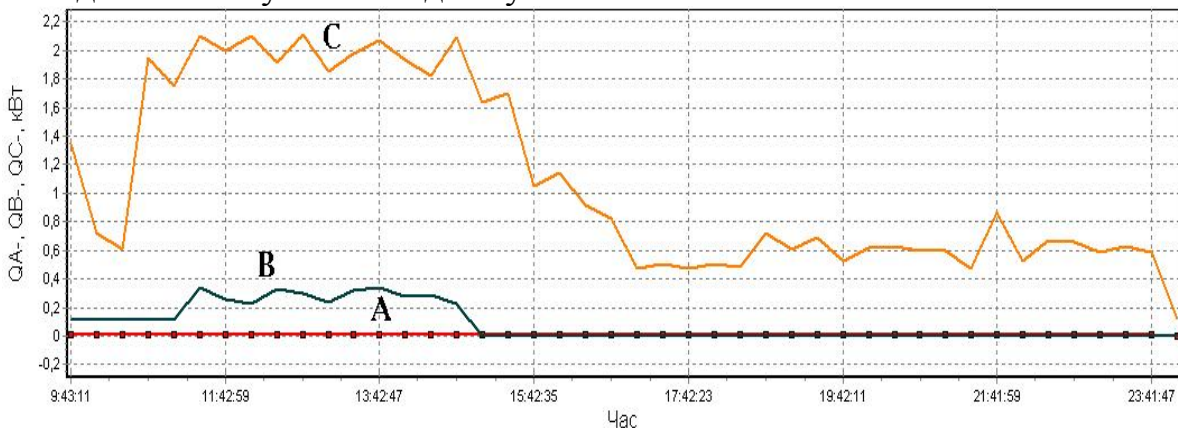


Рис. 8. Графік реактивної від'ємної потужності для трьох фаз

З графіку рис. 8 видно, що в системі присутні паразитні ємнісні та індуктивні навантаження (рис. 8) на різних фазах. Особливу увагу варто приділити сплескам значень реактивної потужності у період з 15:00 до 17:30, тобто при поступовому зменшенні навантаження.

На рис. 9 наведена залежність коефіцієнтів потужності, розрахованих за формулою (1) від часу.

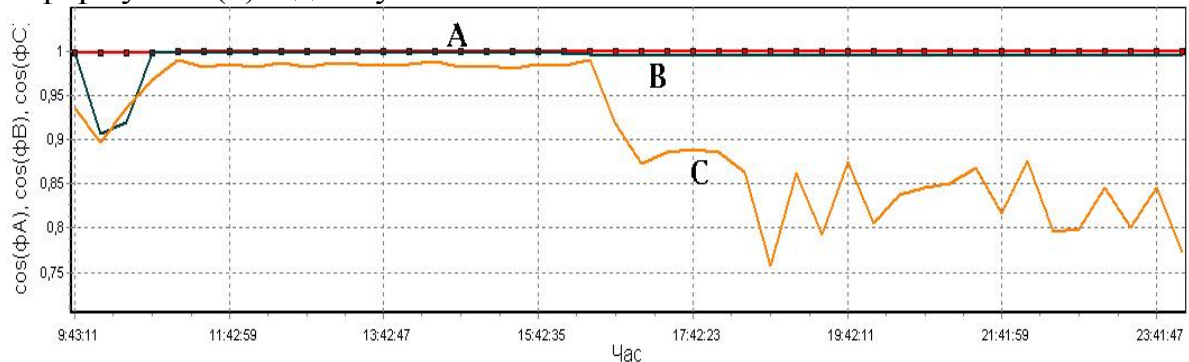


Рис. 9. Графіки коефіцієнтів потужності для трьох фаз

На фазі С коефіцієнт потужності (рис.9) має відхилення від 1, отже присутні теплові втрати, які збільшуються після 16:30.

Висновки та рекомендації

1. Таким чином, розроблений програмно-апаратний комплекс «РПС-Дніпро» дозволяє проводити облік та обробку ряду параметрів електроенергії, а саме: фазових струмів та напруг, лінійних напруг, активної та реактивної потужності, коефіцієнтів потужності, та їх розподіл в часі, відхилень параметрів від нормативних значень. Також система відслідковує наявність паразитних навантажень, теплових втрат тощо.

2. В той же час детальніші рекомендації можливі при більш ґрунтовному дослідженні результатів та отриманні додаткових параметрів, що вимагає модернізації системи за такими напрямками:

- аналіз перехідних процесів у мережі;
- створення засобів для зворотнього керування пристроями зчитування та лічильниками;
- використання для обміну даними протоколу Modbus Ethernet;
- створення графічного інтерфейсу із можливістю керування окремим віддаленим пристроєм;
- введенням зчитування та розрахунку додаткових параметрів, таких як миттєві значення осцилограми для аналізу гармонічності процесу, струми зворотної послідовності тощо;
- створення системи аналізу отриманих даних та видачі рекомендацій щодо подальших дій;
- введення розрахунку вартості електроенергії за декількома тарифними планами;
- підбір елементної бази, здатної зчитувати та розраховувати більшу

кількість параметрів.

3. Із аналізу отриманих та розрахованих даних (рис. 5-9) можна зробити такі рекомендації підприємству, на якому проводилось експериментальне дослідження:

- а) збалансувати навантаження на всіх трьох фазах;
- б) усунути ємнісні та індуктивні навантаження шляхом підбору блоків живлення, компенсуючого обладнання тощо;
- в) перевірити навантаження на фазі С на наявність КЗ та відтоку струмів у нейтраль.

Література

1. В.С. Перхач Теоретична електротехніка: Лінійні кола. Підручник. – К.: Вища шк., 1992. – 439 с.
2. Атабеков Г.И. Линейные электрические цепи: Учебник для вузов. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1978.
3. Програмний комплекс електроенергії/ Березянський Б.М. Малиновський Т.О., Яненко О.П.// Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування». – Вінниця. – 2011.
4. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення
5. ДСТУ ІЕС 60521-2001 Лічильники електроенергії змінного струму класів точності 0,5; 1 та 2 (ІЕС 60521:1998, IDT)
6. Офіційний сайт компанії Modbus// Режим доступу: <http://www.modbus.org/>
7. ДСТУ 3466-96 Качество электрической энергии. Термины и определения.

Березянський Б. М. Програмно-апаратний комплекс дослідження енергоспоживання промислового підприємства. В даній статті розглянуто основні принципи побудови та можливості програмно-апаратного комплексу обліку електроенергії «РПС-Дніпро». Основне призначення комплексу – зчитування ряду параметрів трьохфазної промислової електромережі, розрахунок значень активної та реактивної додатної та від'ємної потужності для кожної фази, коефіцієнту потужності та струму на нейтралі. За розрахованими даними та побудованими графіками є можливість робити висновки щодо енергоспоживання та енергозбереження об'єкту, на якому встановлюється «РПС-Дніпро». Проаналізовано результати експериментального дослідження роботи комплексу, проведеного на невеликому підприємстві. Наведено висновки щодо структури енергетичної системи підприємства.

Ключові слова: облік електроенергії, енергозбереження, автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії.

Березянський Б. М. Програмно-апаратний комплекс дослідження енергопотреблення промислового підприємства. В даній статті розглянуто основні принципи побудови та можливості програмно-апаратного комплексу обліку електроенергії «РПС-Дніпро». Основне призначення комплексу – зчитування ряду параметрів трьохфазної промислової електромережі, розрахунок значень активної та реактивної додатної та від'ємної потужності для кожної фази, коефіцієнту потужності та струму на нейтралі. За розрахованими даними та побудованими графіками є можливість робити висновки щодо енергоспоживання та енергозбереження об'єкту, на якому встановлюється «РПС-Дніпро». Проаналізовано результати експериментального дослідження роботи комплексу, проведеного на

небольшом предприятии. Приведены выводы относительно структуры энергетической системы предприятия.

***Ключевые слова:** учёт электроэнергии, энергосбережение, автоматизированные системы коммерческого учёта электроэнергии.*

*Bereziansky B. **Software-hardware complex studies of energy consumption of industrial enterprises.** This paper examines the main principles and features hardware-software complex of electricity "PSD-Dnepr". The main purpose of the complex - reading a number of parameters the three-phase industrial power, the calculation values of active and reactive power of positive and negative for each phase, power factor and current on the neutral. According to calculated data and Schedules can draw conclusions about the energy consumption and saving an object, which is set "PSD-Dnepr". The results of experimental investigation of the complex is carried out on a small enterprise. Presented findings on the structure of the energy system of the enterprise.*

***Keywords:** accounting of electricity, energy saving, automated system of commercial electric power accounting.*