

УДК 621.314:657

**В.Я. Жуйков**, д.-р. техн. наук, **І.Ю. Бойко**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16, каб.313, Київ, 03056, Україна.

## Застосування динамічної електро - вартісної моделі для дослідження зміни економічних та електротехнічних параметрів генеруючої системи

*Формування вартості електроенергії у локальних енергогенеруючих системах Microgrid повинне базуватись на динамічних моделях, що правильно включатимуть принципово динамічний характер регулювання потужності системи і можливість гнучкої зміни економічних параметрів генеруючої системи. Актуальним завданням є створення динамічної математичної моделі системи «виробник - споживач» електроенергії, що має поєднувати, з одного боку, енергетичні показники генеруючої системи, а з іншого - економічні показники замкненої макроекономічної системи. У статті розглянуто приклад ізольованої системи, що складається із дизельного генератора та споживача. Отримана у результаті модель дозволяє досліджувати вплив макроекономічних параметрів ізольованої системи на зміну вартісних показників економічної системи при зміні рівня потужності, враховуючи наявність перехідних процесів у генераторі. Бібл. 8, рис. 6, табл. 2.*

**Ключові слова:** *Microgrid; ізольована система; вартість електроенергії; рівняння Фішера.*

### Вступ

Насьогодні оцінка вартості електроенергії у локальних енергогенеруючих системах Microgrid відбувається на основі прогнозування ціни на добу вперед, що не дозволяє адекватно розраховувати вартість та мінімізувати втрати. Перевага використання динамічної моделі тарифікації в порівнянні з 24-годинною моделлю полягає у тому, що вона працює з меншою кількістю даних та дозволяє швидко реагувати на зміни економічних та електротехнічних параметрів, що формують тарифну ціну електроенергії [1]. Проте, запропоновані раніше моделі динамічної тарифікації як правило нехтують часом перемикання режимів роботи генеруючої системи та відповідними перехідними процесами [2,3]. Впровадження технологій SmartGrid наразі дозволяє у реальному часі оцінювати попит і пропозицію, а також швидко регулювати

електротехнічні параметри генеруючої системи [4]. З огляду на це, метою дослідження є створення динамічної математичної моделі, що дозволить дослідити вплив макроекономічних параметрів системи на електротехнічні, враховуючи наявність перехідних процесів. У подальшому така модель дозволить розробити гнучку динамічну тарифікацію для ізольованих систем розподіленої генерації.

### Динамічна модель ізольованої електро - вартісної системи

Систему «виробник – споживач електроенергії» можна представити як замкнену макроекономічну систему [5], яка поєднує динамічну та економічну частини ізольованої системи.

Споживач отримує електроенергію потужністю  $P$ , взамін сплачує її вартість  $C_P \cdot P$ , де  $C_P$  – ціна одиниці потужності. Певна кількість отриманих коштів  $C_B \cdot V$  витрачається на закупівлю пального, де  $C_B$  – ціна одиниці пального, та на власні потреби. Економічну складову наведеної системи доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівнянням Фішера [6]:

$$M \cdot V = C \cdot Q,$$

де:  $M$  - грошова маса, що робить один оберт за час  $T_V$ , [грн];  $V = \frac{T}{T_V}$  - кількість обертів грошової маси  $M$  за досліджуваний період часу  $T$ ;  $C$  - ціна одиниці продукції, [грн/шт];  $Q$  - кількість виготовленої продукції [шт] за час  $T$ .

Прийнявши, що продукцією є електроенергія (кВт\*сек), рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = C_B \cdot V + C_P \cdot P.$$

Так як споживач в залежності від потреб може збільшувати або зменшувати обсяг споживаної електроенергії, що характеризується рівнем потужності, то за деякий тарифний проміжок часу  $\Delta t$  відбувається зміна рівня виробленої потужності. Враховуючи можливість змінювати величину грошової маси  $M$  та швидкість її обертання  $V$ , рівнянні балансу прийме вигляд:

$$(M + \Delta M) \cdot (V + \Delta V) = \\ = (C_B + \Delta C_B) \cdot (B + \Delta B) + (C_P + \Delta C_P) \cdot (P + \Delta P),$$

де  $\Delta C_B = 0$ , так як вартість пального прийнята сталою величиною.

Отримано:

$$\Delta M \cdot \Delta V + \Delta M \cdot V + M \cdot \Delta V + \Delta M \cdot V = \\ = \Delta P \cdot \Delta C_P + \Delta P \cdot C_P + P \cdot C_P + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B.$$

Нехтуючи малими величинами другого порядку:

$$\Delta M \cdot V + M \cdot \Delta V + M \cdot V = \\ = \Delta P \cdot C_P + P \cdot C_P + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B.$$

Із отриманого рівняння виражена зміна оборотності  $\Delta V$ :

$$\Delta V = (\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + P \cdot C_P + \\ + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B - \Delta M \cdot V - M \cdot V) / M.$$

Припустимо, що грошова маса  $M$  змінилась незначним чином:

$$\Delta V = [(\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + \\ + P \cdot C_P + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B) / M] - V.$$

$$\frac{dV}{dt} \cdot \Delta t = \Delta V, \text{ звідки:}$$

$$\frac{dV}{dt} = [(\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + P \cdot C_P + \\ + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B) / (M \cdot \Delta t)] - V / \Delta t,$$

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = [(\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + P \cdot C_P + \Delta B \cdot C_B + \beta \cdot P \cdot C_P) / M] - V, \\ \frac{dP}{dt} = -(P / \tau) + (\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V) / (C_B \cdot (1 + 1 / \beta) \cdot \tau) + (\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B) / \tau. \end{cases}$$

де  $(\Delta B \cdot C_B) / M$  та  $(\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B) / \tau$  - впливи.

Тобто, отримано математичну модель, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель - генератором, та дозволяє досліджувати динамічний вплив макроекономічного парамет-

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = -M + (\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + P \cdot C_P + \beta \cdot P \cdot C_P) / V + (\Delta B \cdot C_B) / V, \\ \frac{dP}{dt} = -(P / \tau) + [(\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V) / (C_B \cdot (1 + \frac{1}{\beta}) \cdot \tau)] + (\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B) / \tau. \end{cases}$$

### Дослідження динамічної зміни економічних та електротехнічних параметрів системи

Задля того, аби дослідити зміну оборотності грошової маси під час перехідних процесів у генеруючій системі, було виконано моделювання

де  $\Delta t = 1$ с.

Прийнято, що  $B \cdot C_B = \beta \cdot P \cdot C_P$ , де  $1 / \beta$  - коефіцієнт прибутку системи:

$$\frac{dV}{dt} = [(\Delta P \cdot C_P + P \cdot \Delta C_P + P \cdot C_P + \\ + \Delta B \cdot C_B + \beta \cdot P \cdot C_P) / M] - V. \quad (1)$$

Приріст потужності дизель-генератора визначається рівнянням:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B$$

де  $\eta_B$  - ККД генератора,  $\gamma$  - коефіцієнт перетворення пального у вироблену потужність,  $\tau$  - стала часу генератора.

Із рівняння Фішера, з урахуванням заміни  $B \cdot C_B = \beta \cdot P \cdot C_P$ :

$$M \cdot V = B \cdot C_B + [(B \cdot C_B) / \beta],$$

$$B = M \cdot V / [C_B \cdot (1 + 1 / \beta)].$$

Тоді, враховуючи зміну кількості пального  $\Delta B$ :

$$\frac{dP}{dt} = -(P / \tau) + (\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V) / \\ / (C_B \cdot (1 + 1 / \beta) \cdot \tau) + (\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B) / \tau, \quad (2)$$

отримано систему:

ра оборотності грошової маси на електротехнічний параметр потужності [7,8].

Аналогічним чином виведено систему рівнянь для дослідження впливу макроекономічного параметра величини грошової маси  $M$  на потужність енергогенеруючої системи  $P$ :

у системі MATLAB 2010, використовуючи різні значення параметрів динамічної моделі. Результати моделювання наведені на рис. 1-3. Параметри моделі наведені у табл. 1.

Таблица 1.

| Параметр  | $V_0$ | $M$              | $P_0$  | $\Delta P$ | $\Delta C_P$ | $\beta$ | $\Delta B$    | $C_B$    | $\eta_B$ | $\gamma$ | $\tau$ |
|-----------|-------|------------------|--------|------------|--------------|---------|---------------|----------|----------|----------|--------|
| Випадок 1 | 10    | <b>10000 грн</b> | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | 100 л         | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |
| Випадок 2 | 10    | <b>100 грн</b>   | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | 100 л         | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |
| Випадок 3 | 10    | 100 грн          | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | <b>1000 л</b> | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |

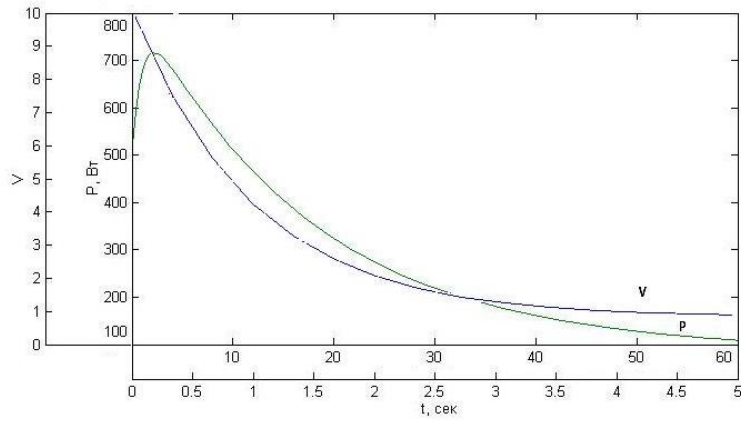


Рис. 1.

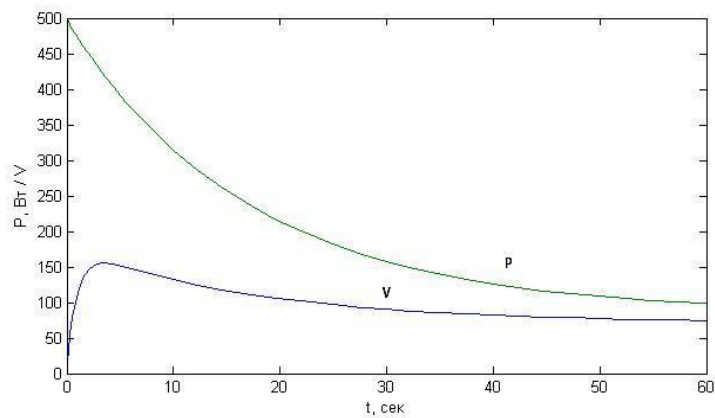


Рис. 2.

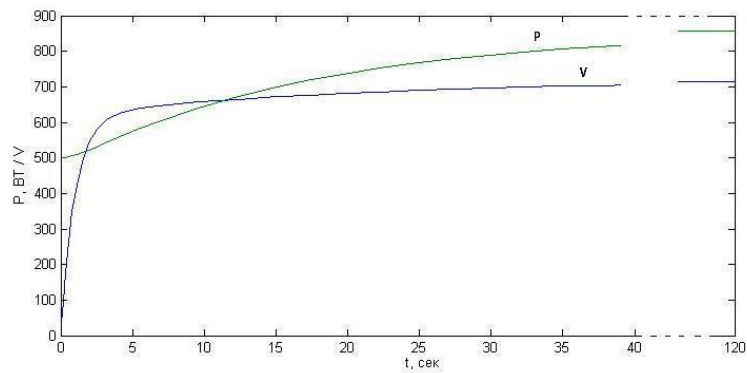


Рис. 3.

Графіки на рис. 1 та 2 демонструють перехідний процес потужності та оборотності під час зменшення її рівня до величини холостого ходу генератора, що підтримується за рахунок заданої кількості пального. Видно, що зменшення величини грошової маси  $M$  призводить до необхідності збільшення оборотності  $V$ , що відповідає умові балансу. На рис. 3 наведено результати моделювання для випадку, коли

відбувається підвищення рівня потужності за рахунок збільшення подачі пального  $\Delta B$ . При цьому оборотність  $V$  також має зростати, так як грошова маса залишається сталою.

Аналогічно було виконано моделювання для дослідження динамічної зміни грошової маси  $M$ . Параметри моделювання наведені у табл. 2, результати на рисунках 4-6.

Таблиця 2.

| Параметр  | $M_0$    | $V$ | $P_0$  | $\Delta P$ | $\Delta C_p$ | $\beta$ | $\Delta B$    | $C_B$    | $\eta_B$ | $\gamma$ | $\tau$ |
|-----------|----------|-----|--------|------------|--------------|---------|---------------|----------|----------|----------|--------|
| Випадок 1 | 1000 грн | 10  | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | 0 л           | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |
| Випадок 2 | 1000 грн | 10  | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | <b>100 л</b>  | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |
| Випадок 3 | 1000 грн | 10  | 500 Вт | 0 Вт       | 5 грн/Вт     | 1       | <b>1000 л</b> | 50 грн/л | 0,5      | 1 Вт/л   | 15 с   |

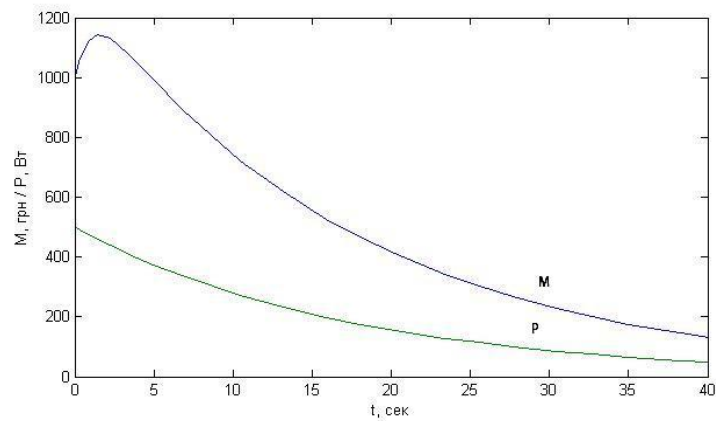


Рис. 4.

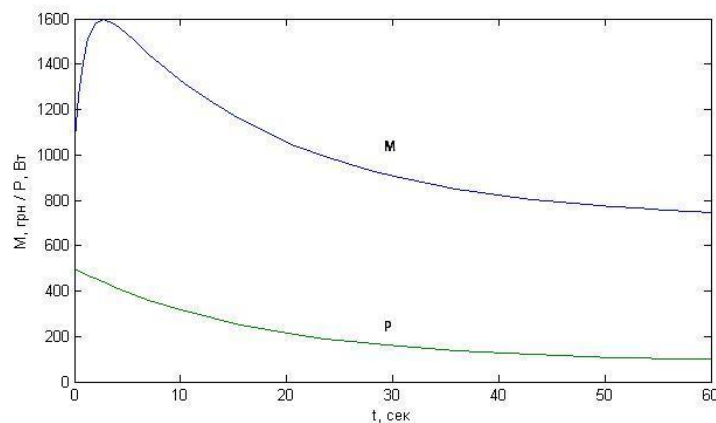


Рис. 5.

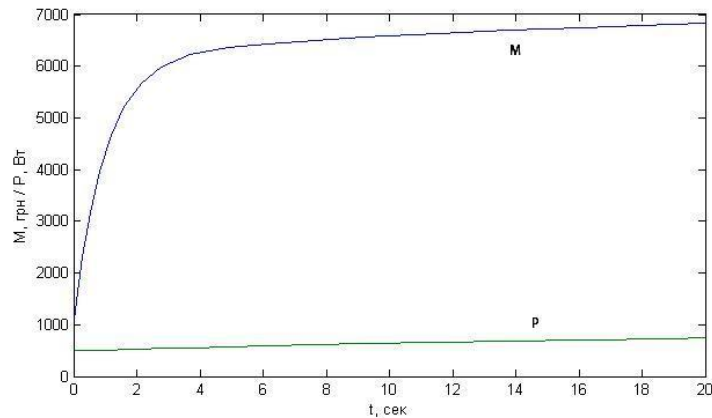


Рис. 6.

На рис. 4 наведено графіки перехідних процесів для випадку, коли завдяки сталому значенню оборотності падіння потужності генератора до нуля спричиняє відповідне падіння грошової маси до нуля. У другому випадку, графіки якого наведені на рис. 5, генератор переходить у режим холостого ходу, відповідно, грошова маса повинна зменшитися до величини, необхідної для забезпечення рівня потужності холостого ходу. На рис. 6 демонструється вплив збільшення подачі пального на зростання потужності генератора і відповідне зростання грошової маси.

### Висновок

На основі запропонованої раніше динамічної електро - вартісної математичної моделі ізольованої генеруючої системи проведено дослідження впливу макроекономічних параметрів системи на електротехнічні, що дозволяє адекватно оцінити взаємопов'язані динамічні зміни цих параметрів, враховуючи наявність перехідних процесів при зміні режимів роботи генератора. Подальше розширення і вдосконалення моделі дозволить розробити гнучку динамічну тарифікацію для ізольованих систем Microgrid, що працюють у складі енергосистем розподіленої генерації.

### Список використаних джерел

1. A. Esmaeili K., M. Eghlimi, M. Oloomi B., H. Shakouri G., A. Sadeghi, «Forecasting the Electrical Energy Price in Iran Power Market: A Comparison between Single and Multi Hour Models» // IPEC, 2010 Conference Proceedings.

2. Steven Wong and J. David Fuller, «Pricing Energy and Reserves Using Stochastic Optimization in an Alternative Electricity Market» // IEEE Transactions on Power Systems, 2007, Volume 22, Issue 2.
3. Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, and Kameshwar Poolla - «Consolidated Dynamic Pricing of Power System Regulation» // IEEE Transactions on Power Systems, 2013, Volume:28, Issue: 4.
4. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin and Xuemin Shen - «UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid» // IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 4, No. 1, March 2013
5. Ledin, S. V. Концепція «електроенергія — товар» як каталізатор розвитку Smart Grid. Автоматизація в промисловості, 2012, 4, 4.
6. Michael D. Bordo, "Equation of exchange" // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–77.
7. V. Zhuikov, J. Petergerya, O. Ivanin, "Electrocost models of sources and loads for Local object power control" // 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", At Waplewo, Poland, 2010, Volume 3.
8. Zhuikov, V.; Pichkalov, I.; Boyko, I.; Blinov I. "Price formation in the energy markets of Ukraine" // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2015 IEEE 35th International Conference.

Поступила в редакцію 7 августа 2016 г.

УДК 621.314: 657

**В.Я. Жуйков**, д.-р. техн. наук, **И.Ю. Бойко**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая, 16, каб.313, Киев, 03056, Украина.

## **Применение динамической электро - стоимостной модели для исследования изменения экономических и электротехнических параметров генерирующей системы**

*Формирование стоимости электроэнергии в локальных энергогенерирующих системах Microgrid должно базироваться на динамических моделях, которые правильно учитывают принципиально динамичный характер регулирования мощности системы и дают возможность гибкого изменения экономических параметров генерирующей системы. Актуальной задачей является создание динамической математической модели системы «производитель - потребитель» электроэнергии, которая должна сочетать, с одной стороны, энергетические показатели генерирующей системы, а с другой - экономические показатели замкнутой макроэкономической системы. В статье рассмотрен пример изолированной системы, состоящей из дизель-генератора и потребителя. Полученная в результате модель позволяет исследовать влияние макроэкономических параметров изолированной системы на изменение стоимостных показателей экономической системы при изменении уровня мощности, учитывая наличие переходных процессов в генераторе. Библ. 8, рис. 6, табл. 2.*

**Ключевые слова:** *Microgrid; изолированная система; стоимость электроэнергии; уравнение Фишера.*

UDC 621.314: 657

**V. Zhubikov**, Dr.Sc., **I. Boiko**

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",  
st. Polytehnycheskaya, 16 kab.313, Kiev, 03056, Ukraine.

## **The use of dynamic electro - cost model for the study of changes in economic and electrical parameters of the generating system**

*Formation of the cost of electricity in the local power generating systems of Microgrid should be based on dynamic models that properly take into account the fundamental nature of the dynamic power control system, and enable for flexible changes in economic parameters of the generating system. An urgent task is to create a dynamic mathematical model of the "producer - consumer" system of electricity, which should combine, on the one hand, the energy performance of the generating system, and on the other - economic indicators of macroeconomic closed system. The article describes an example of an isolated system consisting of a diesel generator and the consumer. The resulting model allows to investigate the impact of macro-economic parameters of an isolated system to change the value indicators of the economic system when changing the power level, given the presence of transients in the generator. Reference 8, Figures 6, Tables 2.*

**Keywords:** *Microgrid; isolated system; the cost of electricity; the Fisher equation.*

### **Reference**

1. *Esmaeili, A. K., Eghlimi, M., Oloomi, M. B., Shakouri, H. G., Sadeghi, A. (2010). Forecasting the Electrical Energy Price in Iran Power Market: A Comparison between Single and Multi Hour Models. IPEC, Conference Proceedings*
2. *Steven Wong and David Fuller, J. (2007). Pricing Energy and Reserves Using Stochastic Optimization in an Alternative Electricity Market. IEEE Transactions on Power Systems Vol. 22, Issue 2.*

3. *Joshua, A., Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan, S. Callaway, and Kameshwar Poolla* (2013). Consolidated Dynamic Pricing of Power System Regulation. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 28 , Issue 4.
4. *Xiaohui, Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin and Xuemin Shen.* (2013). UDP Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid. *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 4, No. 1, March 2013/
5. *Ledin, S. V.* (2012). Концепция «электроэнергия — товар» как катализатор развития Smart Grid. *Автоматизация в промышленности*, 4, 4.
6. *Michael, D. Bordo.* (1987). Equation of exchange. *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, v. 2, pp. 175–77.
7. *Zhuikov, V., Petergerya, J., Ivanin, O.* (2010). Electro-cost models of sources and loads for Local object power control. 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", At Waplewo, Poland, Volume: 3.
8. *Zhuikov, V., Pichkalov, I.; Boyko, I., Blinov, I.* (2015). Price formation in the energy markets of Ukraine. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2015 IEEE 35th International Conference.