

К. В. ЯГУП

## ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ В МЕРЕЖАХ SMART GRID

Розглянуто задачу розробки та вдосконалення інтелектуальних мультиагентних систем керування, які надають можливості інтелектуального онлайн аналізу електричної системи електропостачання забезпеченою смарт грід системою. Метою статті є формування кластерів ділянок електричної мережі, вихідними параметрами якої є основні показники якості електричної енергії у відповідності із прийнятими стандартами. В якості таких параметрів обрані коефіцієнт несинусоїдальності напруг, коефіцієнт несиметрії живильних напруг, реактивна потужність навантажень. Результати проведеної ієрархічної кластеризації ділянок мережі електропостачання зведені у відповідній дендограмі. Для формування дендограми ділянок системи електропостачання використовується метод повного зв'язку. Такий метод визначає відстань між кластерами як найбільшу відстань між будь-якими об'єктами у різних кластерах чи найбільш віддаленими сусідами. Міра близькості визначалася Евклідовою відстанню. Отримана деревоподібна діаграма демонструє розподіл ділянок розглянутої системи електропостачання на чотири природні кластери, що наочно розділяє ділянки системи електропостачання на окремі групи за визначеними ознаками, а саме основними параметрами якості електричної системи. Показано, що математичний апарат кластерного аналізу дозволяє вирішити задачу класифікації ділянок системи електропостачання при відхиленні основних параметрів якості електричної енергії від нормально допустимих значень. Доведено, що класифікація може проводитися не лише за одним параметром, а і з використання комбінації декількох параметрів. Результати проведеного аналізу надають можливість в подальшому сформулювати продукційні правила вибору заходів щодо покращення якості електричної енергії, що застосовуються до тієї чи іншої ділянки системи електропостачання.

**Ключові слова:** мережа Smart Grid, кластерний аналіз, якість електричної енергії, експертна система, задача класифікації, вихідні ознаки.

К. V. YAHUP

## APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS IN SMART GRID NETWORKS

The task of developing and improving intelligent multi-agent control systems, which provide opportunities for intelligent online analysis of the electrical power supply system provided by the smart grid system, is considered. The purpose of the article is the formation of clusters of sections of the electrical network, the initial parameters of which are the main indicators of the quality of electrical energy in accordance with the accepted standards. Total harmonic distortion coefficient of voltages, coefficient of unsymmetry of supply voltages, reactive power of loads are chosen as such parameters. The results of the hierarchical clustering of power supply network sections are summarized in the corresponding dendrogram. The method of full connection is used to form a dendrogram of sections of the power supply system. This method defines the distance between clusters as the largest distance between any objects in different clusters or the most distant neighbors. The measure of closeness was determined by the Euclidean distance. The obtained tree-shaped diagram demonstrates the distribution of the sections of the power supply system into four natural clusters, which visually divides the sections of the power supply system into separate groups according to certain characteristics, namely the main parameters of the quality of the power system. It is shown that the mathematical apparatus of cluster analysis allows solving the problem of classification of sections of the power supply system when the main parameters of the quality of electric energy deviate from the normally permissible values. It is proved that the classification can be carried out not only by one parameter, but also by using a combination of several parameters. The results of the conducted analysis provide an opportunity to further form production rules for the selection of measures to improve the quality of electric energy, which are applied to one or another section of the power supply system.)

**Keywords:** Smart Grid network, cluster analysis, quality of electric energy, expert system, classification problem, initial features.

**Вступ.** Обмеженість енергоресурсів, подорожчання різноманітних видів органічного палива, проблеми старіння і зносу мережевого господарства, аварії та руйнування, що трапляються в лініях електропередачі, збільшення використання електроенергії в побутових умовах ставлять нові виклики енергосистемі України і вимагають пошуку нових засобів ефективної економії електричної енергії і підвищення її якості.

Нові можливості в цих напрямках відкриває розвиток інтелектуальних електроенергетичних систем (Smart grid) – модернізованих мереж електропостачання, що дозволяють автоматично підвищувати енергоефективність, надійність, збільшувати економічний ефект тощо, на основі проведеного збору і аналізу інформації, завдяки вимірюванням показників електричної енергії по всім ділянкам електричної мережі [1].

Одним з пріоритетних напрямків реалізації технології смарт грід є використання інтелектуальних

мультиагентних систем керування, які надають можливості інтелектуального онлайн аналізу електричної системи електропостачання, на підставі архівних даних і даних, які надходять в реальному часі [2–5]. Важливим в цьому аспекті є дослідження використання тих чи інших методів збору та аналізу інформації і вибору подальших алгоритмів дій, наприклад, інтелектуальному моделюванню спрацьовування різноманітних пристроїв автоматики, визначенні потенційних проблем в експлуатації, прогнозування відгуку системи на дії оператора; реалізація сценаріїв «що – якщо».

Важливу роль в організації таких технологій відіграє оптимізація процесу заходів за допомогою експертної системи, основою якої є база знань.

У такій сфері облік отриманої інформації може бути використаний з метою формування продукційних правил вибору заходів щодо поліпшення якості електричної енергії, що застосовуються до тієї чи іншої ділянки системи електропостачання за короткий проміжок часу.

© К. В. Ягуп, 2022



**Дослідницька стаття:** Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Суть таких правил полягає у вживанні відповідних організаційних заходів щодо підвищення якісних показників електричної енергії, розподіл яких здійснюється інтелектуальними системами виходячи з аналізу отриманих даних.

Першочерговим у такому підході є автоматичне визначення класу заходів, які необхідно застосувати до ділянки електричної мережі, наприклад, вмиканням корегувального пристрою, що підвищує енергетичні показники системи електропостачання (фільтри, інвертори тощо) або способом регулювання вже наявним пристроєм (налаштуванням параметрів компенсуювальних пристроїв, випрямлячів і т. п.). При такому підході ключовим етапом є застосування кластерного аналізу, який надає можливість класифікувати ділянки системи електропостачання за окремими ознаками [6–11].

**Мета дослідження.** Метою статті є дослідження можливостей застосування кластерного аналізу, щодо виокремлення ділянок системи смарт грид за основними показниками якості електричної енергії, що застосовуються в енергетиці.

**Основний текст.** Математичний апарат кластерного аналізу надає можливість розбиття множини об'єктів, що досліджуються, і ознак, на однорідні у відповідному розумінні групи або кластери. Тобто кластерний аналіз дозволяє вирішити задачу класифікації даних та визначення відповідної структури. Для підвищення якості електроенергії важливо розрізнити ділянки системи електропостачання, за окремими ознаками, до яких можна буде застосувати відповідні заходи, щодо покращення електроенергетичних показників. Вибір ділянок електричної мережі із показниками якості електричної енергії, замірними протягом деякого часу в даному випадку представляє собою базу проведення кластерного аналізу. Вибір вхідних параметрів для проведення кластерного аналізу виконаємо згідно із основними стандартами [12], що використовуються на даний час.

Такими параметрами мають бути наступні суттєві показники якості електричної енергії: коефіцієнт несинусоїдальності напруг системи електропостачання (що відображає викривлення синусоїдальної форми

напруги в мережі та наявність вищих гармонічних складових у мережі), коефіцієнт несиметрії струмів (що демонструє нерівномірність навантаження фаз системи електропостачання) та реактивна потужність навантаження (що обумовлює втрати в лінії електропередачі).

В дослідженні розглядаються величини вихідних параметрів ділянок системи електропостачання низького класу напруг 0,4 кВ, відображені в табл. 1. Дослідження проводиться для дванадцяти ділянок системи електропостачання. Кожні три ділянки мають один (чи два) параметр, який суттєво відхиляється від норми, а саме – перші три мають значне відхилення від норми коефіцієнту несиметрії, друга група – великі значення реактивної потужності, третя – значні відхилення від норми коефіцієнту несиметрії, четверта група має відхилення одночасно за коефіцієнтом несиметрії і реактивною потужністю.

Для отримання правил виокремлення ділянок електричної мережі з метою призначення рекомендацій для покращення енергетичних показників дослідимо можливості використання кластерного аналізу статистичних даних із загальними ознаками. Метою даного аналізу є розбиття ділянок системи електропостачання на класи, кожен із яких відповідає певній групі, до якої надалі можна буде застосувати певний комплекс заходів. Таким чином, до одного класу повинні потрапляти ділянки системи електропостачання з максимально схожими відхиленнями від норми показниками електричної енергії.

Виходячи з отриманих результатів класифікації ділянок, можна застосувати комплекс заходів для поліпшення якості електричної енергії для виокремленого класу ділянки електричної мережі, а саме сформувані продукційні правила вибору заходів щодо покращення якості електричної енергії.

Для проведення кластерного аналізу обрано спеціалізований статистичний пакет Statistica, що дозволяє застосувати найсучасніші методи математичної статистики для обробки даних. Крім того, важливою перевагою цього пакету є зручність його використання, швидкість виконання обчислень та широкі графічні можливості.

Таблиця 1 – Показники вимірів основних параметрів на дванадцяти ділянках електричної мережі SmartGrid

Номер ділянки	Активна потужність	Напруга	Струм навантаження	Коефіцієнт несиметрії	Реактивна потужність	Коефіцієнт несинусоїдальності
1	1080	400	2,7	2,7	127	0,3
2	1800	400	4,5	0,7	210	4,8
3	3120	400	7,8	3,25	405	0,8
4	2840	400	7,1	4,45	115	0,4
5	920	400	2,3	0,7	418	0,3
6	1520	400	3,8	0,6	450	0,4
7	2520	400	6,3	3,67	390	0,8
8	1600	400	4	0,6	168	3,96
9	2400	400	6	0,5	470	0,5
10	2240	400	5,6	3,05	167	0,5
11	3240	400	8,1	2,95	350	0,8
12	1040	400	2,6	0,5	123	4,16

Таблиця 2 – Вихідні данні інтелектуальної системи після виконання операції стандартизації над основними показниками якості електричної енергії

Номер ділянки	Активна потужність	Напруга	Струм навантаження	Коефіцієнт несиметрії	Реактивна потужність	Коефіцієнт несинусоїдальності
1	1080	400	2,7	0,486083	-1,09616	-0,68162
2	1800	400	4,5	-0,85023	-0,51201	1,925136
3	3120	400	7,8	0,853569	0,860391	-0,39198
4	2840	400	7,1	1,655355	-1,18062	-0,62369
5	920	400	2,3	-0,85023	0,951885	-0,68162
6	1520	400	3,8	-0,91704	1,1771	-0,62369
7	2520	400	6,3	1,134194	0,754822	-0,39198
8	1600	400	4	-0,91704	-0,80761	1,438542
9	2400	400	6	-0,98386	1,317859	-0,56576
10	2240	400	5,6	0,719938	-0,81464	-0,56576
11	3240	400	8,1	0,653122	0,473303	-0,39198
12	1040	400	2,6	-0,98386	-1,12432	1,554397

Наочною демонстрацією розбиття ділянок систем електропостачання на кластери за окремими ознаками має бути побудова дендограми.

Наведені в табл. 1 параметри, використовують різноманітні одиниці вимірювання, що зумовлює необхідність їхньої нормалізація – що приведе до безрозмірних одиниць і надасть в подальшому можливість вимірювання близькості об'єктів [13, 14].

Результати виконання нормалізації зведені в табл. 2.

Техніка нормування зводить данні до єдиного масштабу, що надає можливість відображати данні в різних одиницях вимірювання відобразити в єдиній системі координат. В розглянутому дослідженні данні були нормалізовані відніманням середнього і діленням на стандартне відхилення, таким чином, що дисперсія стала рівною одиниці.

Для побудови дендограми ділянок системи електропостачання використовувався метод повного зв'язку. Такий метод визначає відстань між кластерами як найбільшу відстань між будь-якими об'єктами у різних кластерах чи найбільш віддаленими сусідами.

Міра близькості визначалася Евклідовою відстанню (відстанню за прямою) за формулою

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

При виконанні кластерного аналізу в якості об'єктів використовувалися спостереження, а саме, дванадцять ділянок системи електропостачання, а в якості змінних використовувалися показники якості електричної енергії – коефіцієнт несиметрії, реактивна потужність та коефіцієнт несинусоїдальності.

Отримана деревоподібна діаграма (рис. 1) дозволяє зробити висновок, що ділянки системи електропостачання утворюють чотири природні кластери.

До першої групи увійшли ділянки С\_2, С\_8, С\_12, в яких загальна ознака – відхилення коефіцієнту несинусоїдальності від нормально допустимих значень. Другий кластер утворює множину ділянок С\_5, С\_6, С\_9 з високим показником реактивної потужності. До третього кластеру відносяться ділянки С\_3, С\_7, С\_11 що мають відхилення відразу по двом параметрам – коефіцієнту несиметрії та реактивною потужністю. До четвертого окремого кластеру увійшли ділянки С\_1, С\_4 і С\_10 із коефіцієнтом несиметрії, значення якого бажано знизити. Згідно з дендограмою друга, третя і четверта групи кластерів об'єднані в одну групу, яку можна трактувати, що ці групи мають загальні ознаки – відхилення від нормально допустимих значень двох параметрів, а саме реактивної потужності і коефіцієнту несиметрії.

Таким чином в результаті виконаного дослідження показано, що застосування кластерного аналізу надає можливість ефективно виокремлювати ділянки системи електропостачання за основними показниками якості електричної енергії.

**Висновки.** 1. Визначені основні ознаки, по яким можна проводити кластерізацію ділянок електричної мережі. Такими ознаками мають бути основні показники якості електричної енергії – коефіцієнт несиметрії, реактивна потужність та коефіцієнт несинусоїдальності.

2. Показано, що математичний апарат кластерного аналізу дозволяє вирішити задачу класифікації ділянок системи електропостачання при відхиленні основних параметрів якості електричної енергії від нормально допустимих значень.

3. Доведено, що класифікація може проводитися не лише за одним параметром, а і з використання комбінації декількох параметрів. У такому випадку ділянки системи із двома показниками були виділені в окремий кластер.

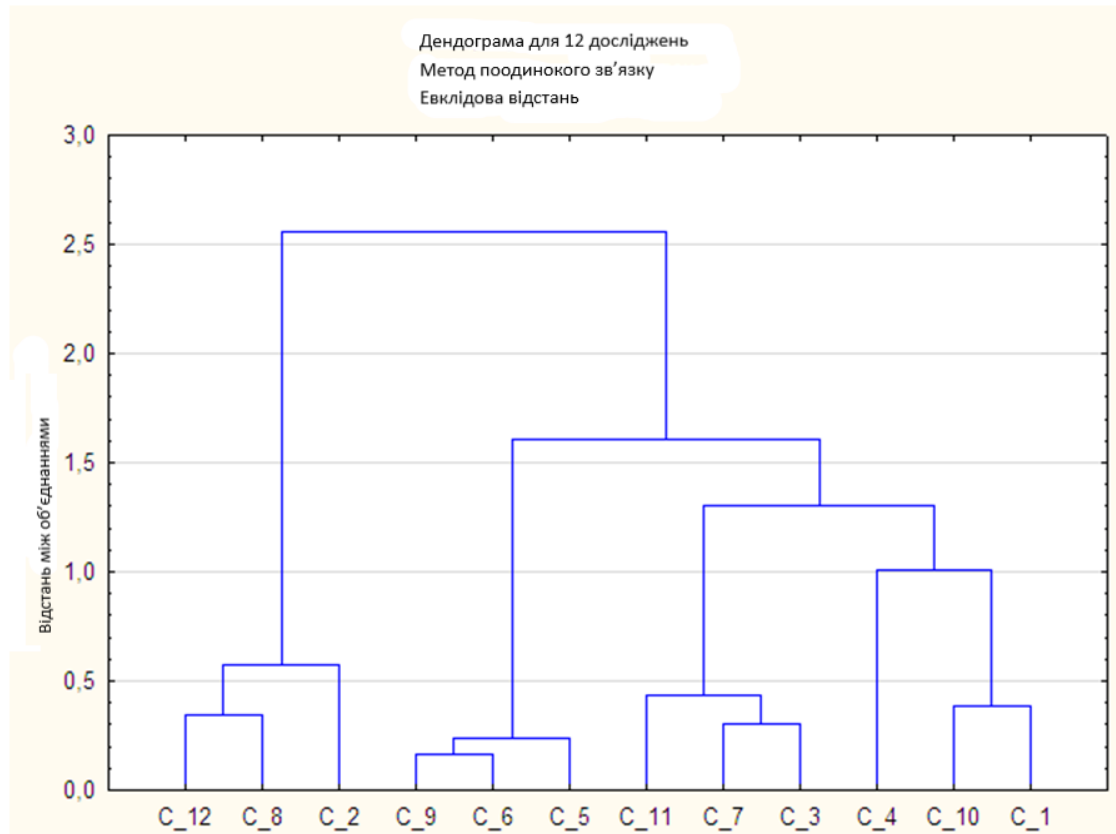


Рис. 1. Ієрархічна кластеризація ділянок мережі електропостачання

4. Результати проведеного аналізу дозволять в подальшому сформувані продукційні правила вибору заходів щодо покращення якості електричної енергії, що застосовуються до виокремлених класів ділянок системи електропостачання.

#### Список літератури

1. Bagdadee A. H. Smart Grid: A Brief Assessment of the Smart Grid Technologies for Modern Power System. *Journal of Engineering Technolog.* 2019. Vol. 8. P. 122–142.
2. Melike E. K., Mouftah H. T. Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid: a survey on interactions and open issues. *IEEE Commun Surv Tutor.* 2015. No. 17 (1). P. 179–196.
3. Spanò E., Niccolini L., Pascoli S., Iannaccone G. Last meter smart grid embedded in an internet-of-things platform. *IEEE Trans Smart Grid.* 2015. Vol. 6 (1). P. 468–75.
4. Benysek G., Kazmierkowski M. P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2011. Vol. 59, no. 4. P. 455–473.
5. Денисюк С. П., Стшелєцькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал.* 2019. № 3 (57). С. 7–22.
6. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. *Базы знаний интеллектуальных систем.* Санкт-Петербург: Питер, 2000. 384 с.
7. Григорьев А. А. Кластерный анализ как инструмент обработки данных при анализе информационных систем. *Известия российского экономического университета им. Г. В. Плеханова.* 2013. № 1 (11). С. 36–48.
8. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И. И. *Методы и модели анализа данных: OLAP и DataMining* Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.

9. Волосюк Ю. В. Аналіз алгоритмів кластеризації для задач інтелектуального аналізу даних. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка.* 2014. Вип. 47. С. 112–119.
10. Gulak D. Using cluster analysis for research of Ukrainian electricity market. *TheScientificHeritage.* Budapest, 2017. No. 10 (10). P. 23–26.
11. Мандель И. Д. *Кластерный анализ.* Финансы и статистика, Москва, 1988. 176 с.
12. ГОСТ 13109-97. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.* Москва: ИПК Издательство стандартов, 1998. 35 с.
13. Стукач О. В. *Программный комплекс STATISTICA в решении задач управления качеством: учебное пособие.* Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 16 с.
14. Буреєва Н. Н. *Многомерный статистический анализ с использованием ППП "STATISTICA". Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики».* Нижний Новгород, 2007. 112 с.

#### References (transliterated)

1. Bagdadee A. H. Smart Grid: A Brief Assessment of the Smart Grid Technologies for Modern Power System. *Journal of Engineering Technolog.* 2019, vol. 8, pp. 122–142.
2. Melike E. K., Mouftah H. T. Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid: a survey on interactions and open issues. *IEEE Commun Surv Tutor.* 2015, no. 17 (1), pp. 179–196.
3. Spanò E., Niccolini L., Pascoli S., Iannaccone G. Last meter smart grid embedded in an internet-of-things platform. *IEEE Trans Smart Grid.* 2015, no. 6 (1), pp. 468–75.
4. Benysek G., Kazmierkowski M. P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a

- survey. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2011, vol. 59, no. 4, pp. 455–473.
5. Denisjuk S. P., Stsheletski R. Formuvannya skladovikh intelektualnoi platformi keruvannya energetichnimi sistemami ta merezhami [Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks]. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya: naukoviy zhurnal* [Energy: economy, technology, ecology: scientific journal]. 2019, no. 3 (57), pp. 7–22.
  6. Gavrilova T. A., Khoroshevskiy V. F. *Bazy znaniy intelektualnykh system* [Knowledge bases of intelligent systems]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2000. 384 p.
  7. Gpigopev A. A. Klasternyy analiz kak instrument obrabotki dannykh pri analize informatsionnykh system [Cluster analysis as a data processing tool in the analysis of information systems]. *Izvestiya rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G. V. Plekhanova* [Proceedings of the Russian University of Economics after G. V. Plekhanov]. 2013, no. 1 (11), pp. 36–48.
  8. Barsegyan A. A., Kupriyanov M. S., Stepanenko V. V., Kholod I. I. *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i Data Mining*. [Methods and models of data analysis: OLAP and DataMining]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2004. 336 p.
  9. Volosyuk Yu. V. Analiz algoritmv klasterizatsii dlya zadach ntektualnogo analizu danikh [Analysis of clustering algorithms for data mining tasks]. *Zbirnik naukovikh prats Viyskovogo institutu Kiivskogo natsionalnogo universitetu im. Tarasa Shevchenka*. [Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National University named after Taras Shevchenko]. 2014, no. 47, pp. 112–119.
  10. Gulak D. *Using cluster analysis for research of Ukrainian electricity market*. The scientific heritage (Budapest). 2017, no. 10 (10), pp. 23–26.
  11. Mandel I. D. *Klasternyy analiz* [Cluster analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1988. 176 p.
  12. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshogo naznacheniya* [Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 1998. 35p.
  13. Stukach O. V. *Programmnyy kompleks STATISTICA v reshenii zadach upravleniya kachestvom: uchebnoye posobiye* [Program complex STATISTICA in solving problems of quality management: a tutorial.]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2011. 16 p.
  14. Bureyeva N. N. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz s ispolzovaniyem PPP "STATISTICA". Uchebno-metodicheskiy material po programme povysheniya kvalifikatsii «Primeneniye programnykh sredstv v nauchnykh issledovaniyakh i prepodavanii matematiki i mekhaniki»* [Multivariate statistical analysis using STATISTICA AP. Educational and methodological material for the advanced training program "Application of software in scientific research and teaching of mathematics and mechanics"]. Nizhny Novgorod, 2007. 112 p.

*Надійшла (received) 15.10.2022*

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Ягуп Катерина Валеріївна** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри ПІІТУ; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: [kata3140@gmail.com](mailto:kata3140@gmail.com)

**Yagup Kateryna Valeriivna** – Doctor of Technical Sciences, professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the department of PIITC; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: [kata3140@gmail.com](mailto:kata3140@gmail.com)