

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 666.983

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.46

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГУВАННЯ

Блажко В. В.¹, Лебедев П. М.² Сасенко Л. В.¹, Григорків О. Б.¹¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова²ПАТ «Бетон Нова»

Анотація. Розглянуто методику проведення експериментального дослідження процесу формування залізобетонних виробів. Визначені та проаналізовані основні фактори, що впливають на показники якості виробу, що формується. На підставі проведеного активного та факторного експерименту створено рівняння регресії, отримано графічні залежності впливу цих факторів на процес, визначені раціональні параметри процесу центрифугування, які є визначальними для виготовлення залізобетонних виробів методом центрифугування. Під час оброблення даних лабораторного експерименту розроблено рекомендації щодо оптимізації робочих параметрів промислового обладнання для формування залізобетонних виробів методом центрифугування.

Ключові слова: центрифугування, залізобетон, механічне обладнання, робочі параметри, фактори, експеримент, залежність, відцентрова сила, частота обертання.

Вступ

Процес центрифугування (відцентровий метод) залізобетонних виробів – це спосіб виготовлення залізобетонних елементів, зокрема стовпів, труб або виробів циліндричної форми, за допомогою центрифуги. Основною ідеєю цього процесу є використання відцентрової сили для формування (ущільнення) бетонної суміші та видалення надлишкової води й повітря, що потрапляє всередину суміші під час її виготовлення [1].

Процес центрифугування зазвичай містить такі етапи: підготовка бетонної суміші; наповнення форми або матриці; транспортування до центрифуги; центрифугування; транспортування з центрифуги та висихання.

Аналіз публікацій

Під час відцентрового методу формування форма з бетонною сумішшю обертається з певною швидкістю навколо своєї поздовжньої осі [2]. Це призводить до виникнення відцентрової сили, яка розподіляє частки суміші вздовж стінок форми та переміщує їх подалі від осі обертання. Таким чином, маса притискається до стінок форми, ущільнюючи її. У виробі утворюється внутрішня циліндрична порожнина, що дозволяє формувати труби та трубчасті конструкції. Зовнішній обрис поперечного перерізу елементів трубчастої конструкції може бути круглим, багатокутним, квадратним. Розміри виробів, які

виготовляються відцентровим методом, можуть бути значними як у поперечному перерізі (труби діаметром 2 м і більше), так і за довжиною (до 15 м і більше).

Для відцентрового формування використовуються центрифуги, в яких циліндрична форма з бетонною сумішшю обертається із заданою швидкістю.

Існують три типи центрифуг для формування труб і трубчастих конструкцій, що відрізняються залежно від способу закріплення форм і процесу обертального руху [3]:

- осьові центрифуги, в яких форма міцно затискається в торцях між двох бабок, що містять планшайби, насаджені на шпindel, що обертається;
- вільно-роликові, в яких форма вільно лежить на обертових катках (роликах) і притискається до них під впливом власної ваги або притискними верхніми роликами;
- пасові центрифуги, в яких форма вільно підвішена на ремнях починає обертатися завдяки силам тертя між пасами та ребордами форми.

Визначення невирішених проблем

У процесі формування залізобетонних виробів методом центрифугування можуть виникати деякі проблеми, зокрема нерівномірне розподілення суміші в корпусі форми, нерівномірне розподілення арматури, фор-

мування порожот або тріщин, недостатнє ущільнення суміші.

У випадку неправильного контролю параметрів процесу центрифугування можна отримати вироби різної якості, що може призвести до відхилень від специфікацій і стандартів.

Проблеми з деформацією форм після формування виробу можуть призвести до пошкодження виробів або інших складностей [4–7].

Мета та постановка завдання

На підставі одержаних результатів проведеного факторного експерименту були розроблені рекомендації щодо раціональних

параметрів процесу формування стовпів залізобетонних опор для ліній електропередач методом центрифугування в умовах технологічної лінії, що використовується.

Виклад основного матеріалу

Під час центрифугування виробів на обладнанні технологічної лінії підприємства з виробництва залізобетонних опор ліній електропередач в діапазоні частот обертання центрифуги, що наведені в табл. 1, відбувається часткове розподілення бетонної суміші. Водночас повного водовідведення не відбувається. Відокремлюється шлам, до складу якого, крім води, належать дрібні фракції піску та частинки цементу.

Таблиця 1 – Режими центрифугування під час виготовлення стійок опор електропередач

Частота обертання, хв^{-1}	Швидкісні режими процесу обладнання				
	1	2	3	4	5
	90	160	240	320	380
Тривалість центрифугування, хв	2	2	2	2	12–14

Відповідно до наукової гіпотези, що обумовлює тривалість процесу формування виробу з досягненням остаточного ущільнення бетонної суміші методом центрифугування, збільшення частоти обертання форми (опалубки) та скорочення завдяки цьому часу центрифугування може призвести до підвищення ефективності використання робочого обладнання зі збільшенням відсотка водовідділення. Збільшення частоти обертання бетонної форми у цьому випадку становить більше ніж 380 хв^{-1} , що має сприяти скороченню часу формування.

Формування контрольних зразків бетону в лабораторних умовах здійснювалося з метою перевірки їхньої міцності на стискання через вимоги, які висуваються до виготовлених стовпів залізобетонних опор методом центрифугування. Нормативна міцність захисного шару бетону у виготовленому виробі складає не менше ніж $f_{ct} = 52 \text{ МПа}$. [8]

Для здійснення активного експерименту був розроблений експериментальний зразок центрифуги (рис. 1, 2) виготовлений за типом шпіндельної центрифуги, що складається з рами, на якій розміщений корпус. У корпусі розташований барабан 4 з верхньою знімною кришкою 2, яка фіксується за допомогою відкидних болтів 7. Корпус розміщений на підшипникових опорах 3. Барабан починає обертатися за допомогою від електродвигуна

1. Приводний вал електродвигуна передає крутний момент крізь фланцеву муфту.

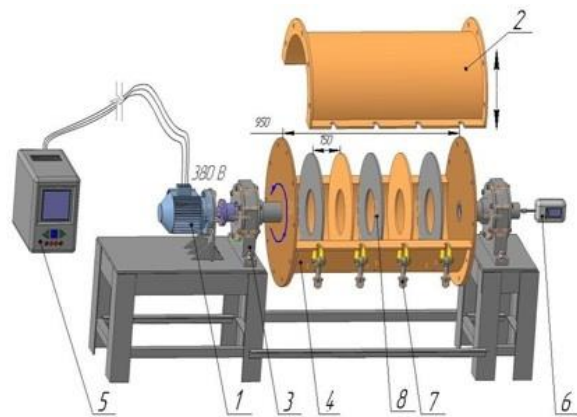


Рис. 1. Зразок експериментального обладнання: 1 – електродвигун; 2 – верхня кришка; 3 – підшипникові вузли; 4 – барабан; 5 – частотний перетворювач; 6 – тахометр; 7 – відкидні болти; 8 – перегородки

Оскільки барабан центрифуги має секційні перегородки, контрольні зразки формувалися на різних складах бетонної суміші за заданих режимів. Зміна частоти обертання барабана здійснюється за допомогою частотного перетворювача 5. Для контролю частоти обертання використовується механічний тахометр 6.

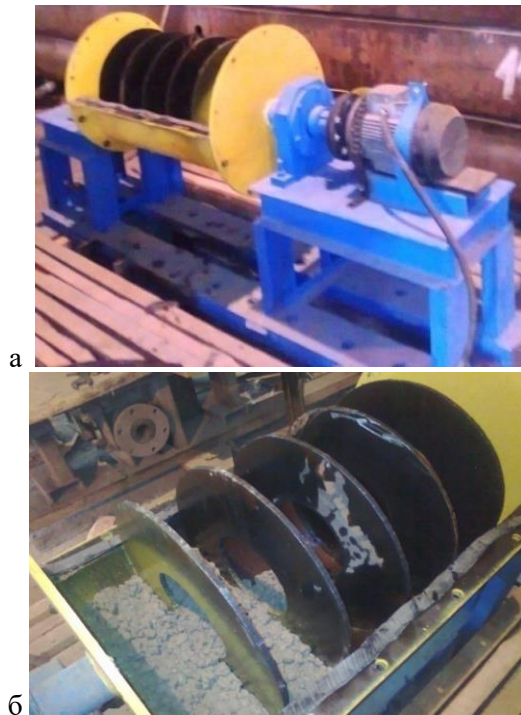


Рис. 2. Експериментальне обладнання: а – вигляд загальний; б – робоча камера

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного обладнання:

Потужність приводу, кВт	5.5
Габаритні розміри:	
висота	1320
довжина	1980
маса	720
Кількість зразків, секцій	6

Після завершення формування, для отримання міцності зразки витримувалися в центрифугі протягом 28 годин за температури не нижче ніж $t = 20^{\circ}\text{C}$. З відкритою кришкою крізь спеціальні отвори вибивалися перегородки 8, після чого зразки випробували щодо міцності на стиснення.

Виготовлення бетонної суміші з максимальним діаметром наповнювача $d_{\text{max}} = 10...20$ мм. здійснювалось із застосуванням бетонозмішувача примусової дії.

Для здійснення експериментальних досліджень використовувалися сировинні матеріали, які відповідають ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні ТУ [9].

Як допоміжне обладнання для контролю було використано таке:

- зважування вихідних компонентів бетонної суміші здійснювалось на електронних вагах ТВЕ-50-1-ВР з класом точності відповідно до ДСТУ EN 45501-П;
- регулювання частоти обертання робочого обладнання здійснювалось за допомогою перетворювача частоти для асинхронних двигунів INVT GD100-004G-4;
- формування контрольних зразків-кубів здійснювали у формах, розміром $100 \times 100 \times 100$ мм);
- міцність на стиснення зразків визначалася на 50-тонному гідравлічному пресі ПСУ-50.

Також було здійснено неруйнівний контроль за допомогою приладу ППС-МГ4 методом рентгенівської рефрактометрії (РН).

Дослідження процесу формування виробів здійснювалось за таких факторів впливу на функцію відкликання:

- Y – міцність бетону на стиснення ($f_{\text{ст}}$) МПа;
- фактори, що впливають на міцність виробів, виготовлених методом центрифугування: x_1 – частота обертання опалубки (n , хв^{-1}); x_2 – час центрифугування (t , хв); x_3 – водоцементне співвідношення (В/Ц);
- варіювання факторів (Табл. 2) розглядалося на трьох основних рівнях (верхній – +1, нижній – -1, нульовий – 0) та двох додаткових (+, -).

Формування дослідних зразків відбувалось з дотриманням таких геометричних параметрів: зовнішній діаметр – $D_1 = 560$ мм; внутрішній діаметр – $D_2 = 460$ мм, довжина – $L = 200$ мм. Армуння зразків не здійснювалось.

Таблиця – 2 Діапазон варіювання змінними

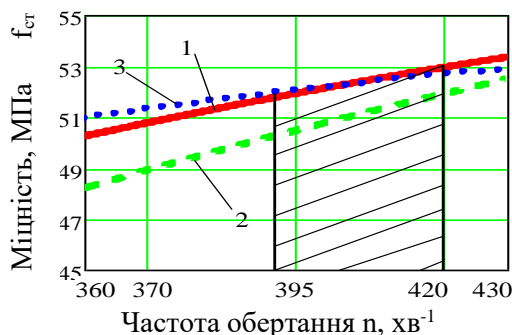
Характеристика	Кодове значення	n , хв^{-1}	t , хв	В/Ц
Основний рівень	X_j^0	395	17,5	0,27
Інтервал варіювання	$D X_j^0$	25	3,5	0,02
Верхній рівень	1	420	21	0,29
Нижній рівень	-1	370	14	0,25
Зіркові плечі	1,414	430,35	22,45	0,3
	-1,414	359,65	12,55	0,24

Дослідження проводилось з використанням бетонної суміші з таким складом компонентів на 1 м^3 бетону: цемент М500 – 475...500 кг (за частоти обертання $n_1 = 380 \text{ хв}^{-1}$, маса цементу становила 500 кг, а у разі, якщо $n_2 = 420 \text{ хв}^{-1}$, – 475 кг), пісок річковий – 497 кг, щебінь фракції 5...20 мм – 1330 кг, вода – 160–174 л (кількість води залежала від В/Ц). Вага суміші для одного зразка (однієї секції центрифуги) становила 20 кг.

У процесі реалізації експерименту та оброблення даних були отримані рівняння регресії показників міцності зразків залежно від факторів, що на неї впливають, та графічні залежності (рис. 3–5), на підставі аналізу яких запропоновані рекомендації щодо раціональних параметрів робочого процесу формування виробів:

$$Y = 51,9 + 1,1n - 1,09V/C + 0,8t, \quad (1)$$

де n – частота обертання форми, хв^{-1} ; В/Ц – водоцементне співвідношення; t – час формування виробу, хв



$$\begin{aligned} \text{Const} = & 1 - t = 17,5 \text{ хв}; \text{ В/Ц} = 0,27 \\ & 2 - t = 14 \text{ хв}; \text{ В/Ц} = 0,25 \\ & 3 - t = 21 \text{ хв}; \text{ В/Ц} = 0,29 \end{aligned}$$

Рис. 3. Залежність міцності контрольних зразків бетону на стиснення від частоти обертання форми

Графічні залежності, наведені на рисунку 3, демонструють, що за високочастотного режиму центрифугування $n = 420 \text{ хв}^{-1}$ (крива 1) досягається максимальна міцність зразків на стиснення $f_{\text{ст}} = 53 \text{ МПа}$ за час центрифугування $t_{\text{ц}} = 17,5 \text{ хв}$ у водоцементному співвідношенні В/Ц = 0,27, що свідчить про можливість зменшення циклу формування виробів.

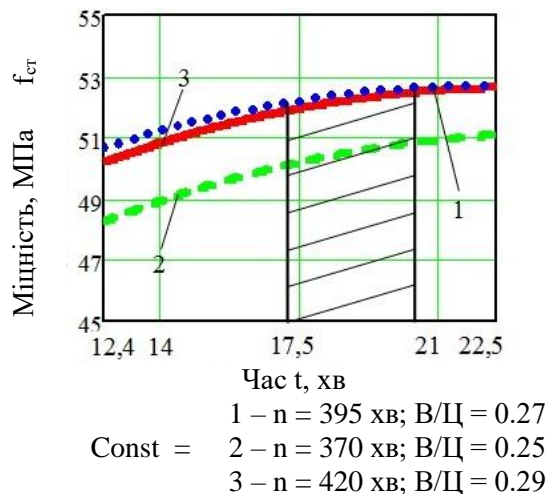


Рис. 4. Залежність міцності контрольних зразків бетону на стиснення від часу центрифугування

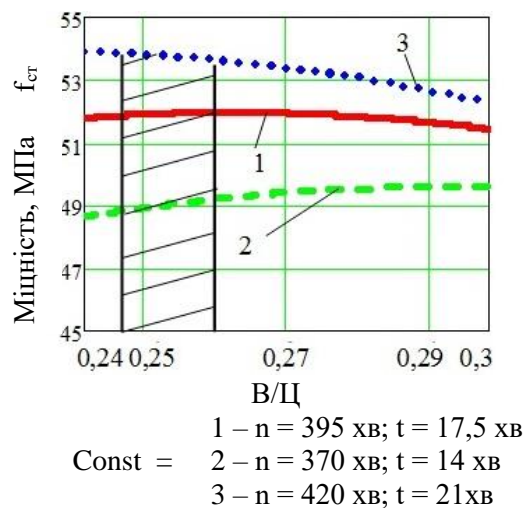


Рис. 5. Залежність міцності контрольних зразків бетону на стиснення від водоцементного співвідношення

Графічні залежності 1–3, наведені на рис. 4, демонструють незначне збільшення показників міцності $f_{\text{ст}}$ зі збільшенням часу центрифугування t . У в діапазоні часу центрифугування $t = 17\text{--}18 \text{ хв}$ досягається максимальне значення $f_{\text{ст}} = 53 \text{ МПа}$, а подальше збільшення t на 5 хв збільшує міцність $f_{\text{ст}}$ лише на 1 МПа. Отже, рекомендованим діапазоном часу центрифугування є $t = 17\text{--}18 \text{ хв}$. Водночас тип кривих демонструє, що для досліджень було вибрано інтервал часу t (хв), близький до умов, що забезпечують максимальну міцність бетону на стиснення.

Залежності, наведені на рис. 5, вказують, що рекомендованим діапазоном водоцементного співвідношення для отримання виробів з високими показниками міцності на стис-

нення за збереження високочастотного режиму центрифугування є діапазон $B/C = 0.24 \div 0.26$, який забезпечує міцність контрольних зразків бетону f_{ct} до 54 МПа.

Висновки

На підставі оброблення одержаних результатів здійсненого факторного експерименту було запропоновано такі рекомендації щодо раціональних параметрів процесу формування стовпів залізобетонних опор для ліній електропередач методом центрифугування в умовах технологічної лінії, що працює:

- частота обертання форми $n = 390\text{--}420 \text{ хв}^{-1}$;
- час центрифугування $t = 17\text{--}18 \text{ хв}$;
- водоцементне співвідношення $B/C = 0,24..0,27$;

За таких параметрів робочого процесу досягаються максимальні показники міцності зразків бетонних виробів на стискання $f_{ct} = 53 \text{ МПа}$, що є основним показником ефективності роботи обладнання.

Література

1. Проектування заводів збірного залізобетону / Борщ І. М., Прикін Б. В., Білогуров В. П., Коробкова Е. М. Київ: «Будівельник», 1968. 268 с.
2. Волянський О. А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій: підручник: у 2 ч. Київ: Вища шк., 1994. Ч. 1. Технологія бетону. 271 с.
3. Шурик В. О. Про вплив жорсткісних, демпфуючих та інерційних характеристик підвіски центрифуги на процес розподілу бетонної суміші при центрифугуванні. Вісник НУВГП: збірник наукових праць. Рівне, 2005. Вип. 2(30). С. 138–145
4. Kliukas, R., Vadlūga, R. Analysis of Structural Spun Concrete properties. In Proceedings of the 3rd International Conferences SDSMS'03, Klaipėda, Lithuania, 17–19 September 2003. Pp. 141–150.
5. Kudzys, A., Kliukas, R. The resistance of compressed spun concrete members reinforced by high-strength steel bars. Mater. Struct. 2008. 41. 419–430.
6. Kliukas, R., Daniunas, A., Gribniak, V., Lukoševičienė, O., Vanagas, E., Patapavičius, A. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessment. Struct. Infrastruct. Eng. 2018. 14. 1221–1232.
7. Kuebler, M., Polak, M. A. Torsion test on spun-cast prestressed concrete poles. PCI J. 2012. 57. 120–141.
8. ДБН В.2.6-98:2009. «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» (<http://surl.li/rkciq>).
9. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Суміші бетонні та бетон. Загальні ТУ (<http://surl.li/rjfeu>).
10. Стефанов Б. В. Технологія бетонних та залізобетонних виробів. Київ: Будівельник, 1965. 383с.

References

1. Designing of plants of precast reinforced concrete reinforced concrete / Borshch I. M., Prykin B. V., Bilogurov V. P., Korobkova E. M. Kyiv: "Budivelnik", 1968. 268 p.
2. Volyansky O. A. Technology of concrete and reinforced concrete structures: textbook: in 2 parts. Kyiv: Higher school, 1994. Part 1. Technology of concrete. 271 p
3. Shchuryk V. O. On the influence of stiffness, damping and inertial characteristics of the centrifuge suspension on the process of distribution of the concrete mixture during centrifugation. Bulletin of NUVHP: collection of scientific papers. Rivne, 2005. Issue 2(30). Pp. 138–145.
4. Kliukas, R., Vadlūga, R. Analysis of Structural Spun Concrete properties. In Proceedings of the 3rd International Conferences SDSMS'03, Klaipėda, Lithuania, 17–19 September 2003. Pp. 141–150.
5. Kudzys, A., Kliukas, R. The resistance of compressed spun concrete members reinforced by high-strength steel bars. Mater. Struct. 2008. 41. 419–430.
6. Kliukas, R., Daniunas, A., Gribniak, V., Lukoševičienė, O., Vanagas, E., Patapavičius, A. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessment. Struct. Infrastruct. Eng. 2018. 14. 1221–1232.
7. Kuebler, M., Polak, M. A. Torsion test on spun-cast prestressed concrete poles. PCI J. 2012. 57. 120–141.
8. DBN V.2.6-98:2009. "Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions" (<http://surl.li/rkciq>)
9. DSTU B V.2.7-176:2008. Concrete mixtures and concrete. General Terms and Conditions (<http://surl.li/rjfeu>)
10. Stefanov B. V. Technology of concrete and reinforced concrete products. Kyiv: Budivelnik, 1965. 383p.

Блажко Володимир Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
blazhko.vladimir@kname.edu.ua,
 тел. +38 097-534-60-67

Лебедєв Павло Миколайович, головний механік, ПАТ «Бетон Нова», pavel.lebedev@ukr.net, тел. +38 098-544-62-61

Сасенко Леонід Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, leonid.saienko@kname.edu.ua, тел. +38 050-915-27-90

Григорків Олексій Борисович, аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, oleksii.hryhorkiv@kname.edu.ua, тел. +38 099-030-62-79

Results of experimental research of the process of forming reinforced concrete products by the centrifugation method

Abstract. The method of conducting an experimental study of the process of forming reinforced concrete products is disclosed. The key factors influencing the quality indicators of the product being formed are defined and considered. On the basis of the conducted active, factorial experiment, a regression equation was compiled, graphical dependences of the influence of these factors on the process were obtained, rational parameters of the centrifugation process were determined, which are decisive in the manufacture of reinforced concrete products by the centrifugation method. Based on the results of laboratory experiment data processing, recommendations were developed for optimizing the operating parameters of industrial equipment for forming reinforced concrete products by the centrifugation method. **Problem.** When forming reinforced concrete products by the centrifugation method, some problems may arise, uneven distribution of the mixture in the mold body and of reinforcement, formation of voids or cracks, insufficient compaction of the mixture. If the parameters of the centrifugation process are not properly controlled, the quality of the products may vary, which may lead to deviations from specifications and standards. Problems with the

deformation of the molds after forming the product can lead to damage to the product or difficulties in its removal. **Goal.** Based on the results of the conducted factorial experiment, recommendations are developed regarding the rational parameters of the process of forming columns of reinforced concrete supports for power transmission lines by the centrifugation method in the conditions of an operating technological line. **Methodology.** The basis of the research is the method of conducting a planned factorial experiment with further statistical processing of the obtained results using a computer program. **Results.** Based on the processing of the obtained results of the conducted factorial experiment, the following recommendations are suggested regarding the rational parameters of the process of forming reinforced concrete pillars for power lines by the centrifugation method in the conditions of an operating technological line.

Key words: centrifugation, reinforced concrete, mechanical equipment, operating parameters, factors, experiment, dependence, centrifugal force, rotation frequency

Volodymyr Blazhko, Ph.D., Assoc. Professor, Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National University of Urban Economy O. M. Beketova, ORCID: 0000-0002-5649-9379, blazhko.vladimir@kname.edu.ua,

Pavlo Lebedev, chief mechanic, Beton Nova PJSC, pavel.lebedev@ukr.net,

Leonid Sayenko, Ph.D., Assoc. Professor, Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National University of Urban Economy O. M. Beketova, ORCID: 0000-0002-3802-3078, leonid.saienko@kname.edu.ua,

Oleksiy Hryhorkiv, graduate student, Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National University of Urban Economy O. M. Beketova, oleksii.hryhorkiv@kname.edu.ua,
¹Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketova, 17, Marshala Bazhanova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.