

doi: 10.32620/oikit.2023.99.07

УДК 621.983.044.4

М. Є. Тараненко, Н. В. Кобріна

## **Підтримка точності значень керуючих параметрів електрогідравличного навантаження при штамповці з просторово-часовим керуванням**

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»*

Стаття присвячена забезпеченню стабільності технологічного процесу електрогідравличної штамповці тонколистових багатогабаритних деталей. Такий процес реалізується на багатоконтурних ЕГ-пресах, що обладнають можливостями просторо-часового керування навантаженням заготовки. Подібне керування забезпечує виготовлення якісних деталей і високі техніко-економічні показники технологічного процесу.

До числа керуючих параметрів відноситься геометрія енерговиділяючої зони пресу, послідовність навантаження ділянок заготовки та величина міжелектродної відстані. Перші параметри слабо змінюються при заданих режимах експлуатації. Третій параметр схильний до змінення протягом означеного числа розрядів у зв'язку з кавітаційної й електроерозійної ерозії. Порушення заданої величини міжелектродної відстані призводить до порушення режиму виділення енергії та її втрати.

У результаті проведених експериментів було визначено механізм кавітаційного руйнування високовольтної ізоляції робочого електрода і пропонується рішення за умовами намотки високовольтної ізоляції скловолокнистим ровінгом, а також електричної ізоляції на ділянках, що прилягають до зони розряду.

Експериментально досліджені декілька варіантів конструктивного оформлення торцевої частини робочого електрода, ще безпосередньо знаходиться у зоні ЕГ-розряду.

У якості критеріального параметра стійкості до електричної ерозії розрядних кромки було вибрано співвідношення тривалості передрозрядної стадії до характеристичного часу розрядного контуру. При цьому тривалість передрозрядної стадії визначалося за осцилограмами розрядного напруження.

За приведеними залежностями названого відношення від числа розрядів визначена краща конструкція із розглянутих варіантів.

Використане значення цього співвідношення для вибраної конструкції відповідає ~ 2500 розрядам при напруженні 20...25 кВ. Така чисельність розрядів у середньому порівняно з роботою на протязі п'яти робочих змін, після котрих необхідно відновлення розрядних кромки електрода. Для спрощення щодо операцій змінення електродів пропонується конструкція, у котрій кріплення електродів здійснюється шляхом його зажиму еластичними шайбами.

Зроблено висновок про досягнення поставленої мети: підтримання стабільної експлуатації ЕГ-преса с високими техніко-економічними показниками усього технологічного процесу при заданій якості виготовлення деталей.

Завдання роботи – оцінювання ефективності пропонується технічних рішень щодо підвищення стійкості робочих електродів та спрощення їх ремонту та відновлення.

**Ключеві слова:** стабільність режиму розрядів, електрогідравлична штамповка, розряди, електроди, листові деталі, експериментальні дослідження.

### **Введення**

Штамування тонколистових багатогабаритних деталей широко застосовуваних в авіа-і ракетобудуванні, представляє значні складності. Їх виготовлення на ЕГ-пресах з просторово-часовим управлінням навантаження заготовок дозволяє спростити техпроцеси і підвищити техніко-економічні

показники виробництва [1]. У робочій зоні таких пресів під багатоконтурним розрядним блоком (БРБ), у розрядних порожнинах (РП) якого виробляють ЕГ-розряди, розташовується плоска заготовка, укладена по периметру. Розряди виробляють у заданих сусідніх РП послідовно з деяким випередженням/затримкою за часом. Це дозволяє покращити умови деформування.

Математичне моделювання процесу багатоімпульсного навантаження дозволило вивчити характерні особливості такого процесу та обґрунтувати підходи до завдання та підтримки значень керуючих параметрів техпроцесу. До цих параметрів відносяться: енергія розряду та їх число, геометрія розташування активних РП, величина міжелектродної відстані в блоках ЕГ-пресів [2, 3].

У процесі функціонування преса більш схильна до зміни саме величина міжелектродної відстані.

Мета роботи – підтримання стабільної експлуатації преса з високими техноко-економічними показниками всього технологічного процесу при заданій якості деталей, що виготовляються.

Завдання роботи - оцінка ефективності технічних рішень щодо підвищення стійкості робочих електродів, що визначають режим виділення енергії, а також спрощення їх допоміжного ремонту.

Метод досліджень – експериментальний.

### Технічна обстановка в зоні виділення енергії

Схематично технічна обстановка одиночної РП БРБ показана на рис. 1. У розрядній плиті БРБ 1 виконана порожнина діаметром  $d_k$ . По її осі встановлений робочий електрод 2,

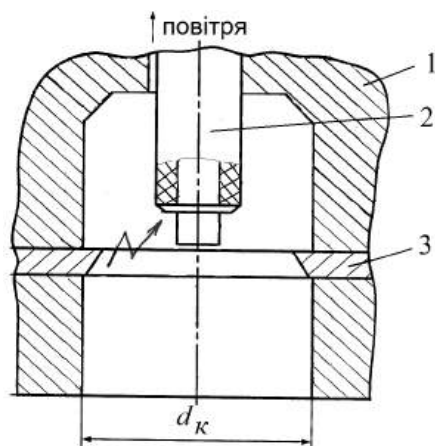


Рис. 1. Схема БРБ

виконаний у вигляді струмопровідного стрижня облицьованого високовольтною ізоляцією. Між електродною плитою 1 і направляючою плитою встановлено розрядне кільце 3. РП заповнена водою. Підводний високовольтний електродний розряд (ЕГ-електрод) проходить між торцевою кромкою центрального електрода 2 і розрядним кільцем 3. Потік енергії, що виділяється, направляється у бік відкритого торця РП.

Для дослідження була прийнята технологічна схема багатоконтурного

електрогідравлічного преса великої енергії, що запасується, оснащеного БРБ. Схематично такий блок відповідає типовим БРБ преса ПЕГ-ХАІ-500 [1]. Розглядається система (рис. 1), що складається з трьох РП, занурених у рідину. Під ними розташована заготовка, що деформується, вона встановлена на витяжну матрицю діаметром 252 мм. Діаметр заготовки – 320 мм і вона притиснута до матриці. Цими умовами виключається витяжка матеріалу заготовки з фланця в порожнину матриці.

Стабілізацію високої якості деталей, що виготовляються, і самого процесу штампування забезпечує точність керуючих параметрів. На ЕГ-пресах з просторово-часовим управлінням навантаження до таких параметрів

відносяться: структура поля розташування РП, кількість розрядів і величина міжелектродної відстані  $l_{me}$ . Підтримка заданих значень перших двох параметрів не викликає труднощів. Підтримка заданих значень  $l_{me}$  вимагає створення певних умов режиму розряду, у тому числі, технічних рішень.

Відома [1] залежність тривалості передрозрядної стадії від керованих параметрів:

$$t_1 = a_0 l_{me}^{a_1} U_0^{a_2}$$

де  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від конструкції електродної системи,

$U_0^{a_2}$  – зарядне напруження.

У цій залежності як співмножник міститься параметр в ступені 2,0...2,5 (для різних конструкцій електродних систем) [1]. Така сильна залежність при розгляді задачі підтримки точності управління при експлуатації передбачає розробку технічних рішень більш тривалої стабілізації значення  $l_{me}$ .

Сприятливі умови ЕГ-розряду визначаються мінімізацією кількості стримерів аж до одного, який перетворюється на канал суцільної провідності. Цьому сприяє низька електропровідність рідини, мінімізація площ елементів РП, що знаходяться під різним електричним потенціалом та геометрія розрядних кромок електродів.

У цьому слід враховувати, що протягом робочої зміни активних РП загалом виробляється 400...6000 розрядів з енергією 15...25 кДж, а у низці техпроцесів і більше. Економічно прийнятні умови роботи показують, що налаштований БРБ повинен функціонувати протягом майже п'яти робочих змін, а у шосту зміну треба робити нове налаштування. Нове налаштування зводиться до зміни електродів.

Порушення заданого режиму виділення енергії при ЕГ-розряді сильно залежить від розмірів оголеної від ізоляції площі центрального електрода і внутрішньої поверхні РП. Так власними дослідженнями авторів встановлено, що облицювання внутрішньої поверхні РП, прилеглих до розрядного кільця (масовий електрод) частинах зумовлює тільки 5...10 % втрат енергії на передрозрядній стадії. Водночас, у відповідних умовах за неізольованої РП втрати енергії досягають 20...30 % при  $U_0=20$  кВ, а при  $U_0=15$  кВ – до 40 %. Амплітуда



Рис. 2. Вид на торець електрода і його препарований переріз уздовж осі струмопровідного стрижня. Стан ізоляції після 220...250 розрядів на робочих режимах штампування кузовної деталі виділення енергії. Після 300...500 розрядів із виділенням 20 кДж енергії на одній

розрядного струму в цих же умовах збільшується в 16...20 разів, час перед-розрядної стадії скорочується до 2,2 разів.

Доволі нескладна технічна операція – облицювання внутрішньої поверхні РП, наприклад, склопластиковою ізоляцією завтовшки в декілька мм, дає змогу отримати значний позитивний ефект.

Досвід експлуатації преса ПЕГ-ХАІ-500 показав не зовсім задовільні результати щодо точності підтримання заданих режимів

електродній парі починає руйнуватися високовольтна склопластикова ізоляція центрального електрода (рис. 2), тим самим збільшуватися площа оголеної частини електрода.

Руйнування має складний характер. Після 200...220 розрядів на заглибленому торці електрода на межі «металевий стрижень – склопластик» спостерігається поява ерозійної канавки, що має форму кільця, під час подальших розрядів канавка активно поглиблюється і перетворюється на кільцеву порожнину. При цьому шар високовольтної ізоляції стоншується і розривається на шматки. На рис. 2, ліворуч показано тріщину в ізоляції, а праворуч – вже препаровану ізоляцію цієї частини електрода. Основні кромки стрижня помітно заокруглені.

Приблизно з 300...400 розрядів починають змінюватися розрядні параметри: струм і напруга зменшуються, а тривалість передрозрядної стадії зростає.

### Результати експериментальних досліджень

У результаті спеціальних досліджень було вивчено механізм утворення ерозійної порожнини, основною причиною утворення якої є кавітація на торці електрода.

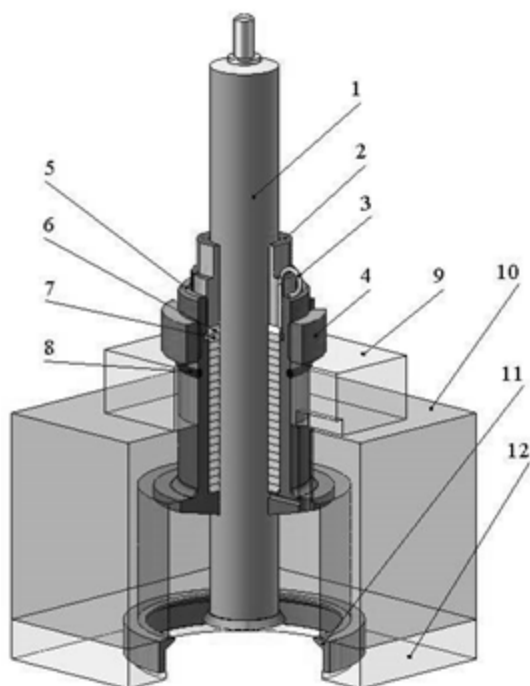


Рис. 3. Пропонована конструкція вузла кріплення швидкозмінного електрода:

- 1 – електрод; 2, 4 – гайка; 3 – штифт;
- 5 – корпус; 6 – шайба;
- 7 – набір кілець гумових; 8 – кільце ущільнювальне; 9, 10 – плита;
- 11 – розрядне кільце; 12 – розрядна плита

Розроблено технічні рішення, що стабілізують процес активного руйнування ізоляції та підтримання заданих режимів розрядів. Загалом вони зводяться до захисту торця електрода металевим наконечником і спрощення операції зміни електродів для ремонту та відновлення.

Типовий вузол кріплення в БРБ показано на рис. 3. У цій конструкції нижній торець електрода захищений металевою шайбою (наконечником). По периферії вона має конічну форму з гострою кромкою шириною 0,3...0,5 мм. Напруженість електричного поля біля кромки більша, ніж у зоні примикання ізоляції. Тому канал суцільної провідності формується від гострої кромки. Такою конструкцією було збільшено периметр оголеної частини і при цьому зросла довжина загостреної кромки.

Торець склопластикової ізоляції прикритий цією шайбою (наконечником) і на нього більшою мірою впливає кавітаційне навантаження.

Проте після 2000...2500 розрядів необхідно оновлювати робочу частину електрода для відновлення порушеної ізоляції. Для спрощення операцій зміни електродів без складання/розбирання

БРБ запропоновано і випробувано спосіб кріплення гладкої циліндричної поверхні електрода розпиранням еластичних кілець 7 (див. рис. 3). Гайка 2 припускається, кільця розтискаються і електрод вільно виймається з корпусу 5. Під час установлення нового електрода операції виконуються у зворотному порядку. Задана величина міжелектродної відстані досягається деяким віддаленням площини розрядної шайби (наконечника) над площиною розрядного кільця 7, затиснутого між плитами корпусу.

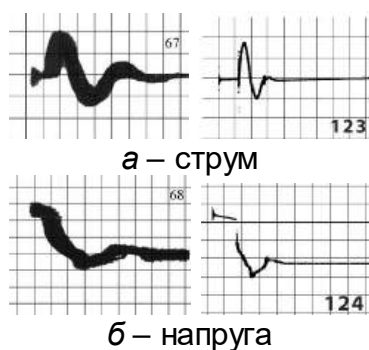


Рис. 4. Характерні осцилограми процесів зміни розрядних струму і напруги в часі

Контроль параметрів розряду здійснювався датчиком розрядного струму (поясом Роговського), що встановлювався на вільній частині електрода, а розрядна напруга – за допомогою ємнісно-омічного дільника напруг. Осцилограми, що показані на рис. 4. ілюструють відносну стабільність режимів розряду при використанні описаної конструкції електродної пари. Для оцінки стабільності режимів після кожного розряду і серії зі 30 розрядів записувався сигнал на екрані запам'ятовуючого електронного осцилографа. Кожен наступний сигнал накладається на попередні (при зміні величин часу передрозрядних стадій) і загальна лінія сигналів потовщувалася. Для оцінки товщини лінії однакового сигналу на рис. 4, праворуч наведено осцилограми параметрів першого сигналу із серії.

Можна виміряти, що сумарна лінія 30 сигналів товща за лінію одного сигналу в  $\sim 5,4$  рази. Інакше: розкид за часом 30 сигналів можна порівняти з тривалістю  $t_1$  (за струмом).

Оцінювання сигналів за напругою ускладнене через вплив ефекту самосинхронізації розрядів, що проявляються в схемах із загальним потенціалом маси (корпуси БРБ).

Параметром, що характеризує стабільність режимів ЕГ-розрядів, може слугувати відношення тривалості передрозрядної стадії до характеристичного

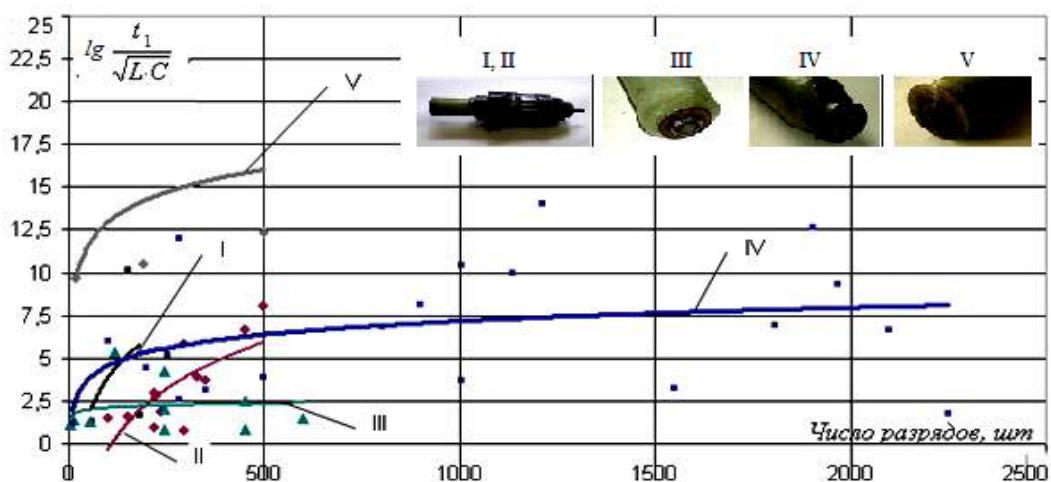


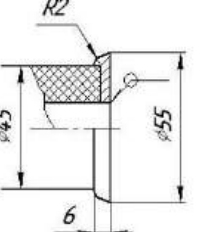
Рис. 5. Зміна відносної тривалості передрозрядної стадії від кількості розрядів. Зарядна напруга 20...25 кВ.

часу розрядного контуру  $\sqrt{LC}$  (тут  $L$  – індуктивність і  $C$  – ємність контуру).

Найзручніше фактичне значення  $t_1$  визначати за осцилограмами розрядної напруги. На рис. 5 показано залежність зазначеного відношення від кількості розрядів. Залежність була побудована для випадку оптимального підбору міжелектродної відстані, яка відповідала максимальній роботі пластичної деформації. Фото робочих закінчень досліджуваних електродів показано на вставці до рис. 5. Як видно, найстабільніші режими розрядів підтримувалися при використанні електродів IV типу. Для них характерна заокруглена форма захисної шайби і значно невелика різниця в діаметрах високовольтної ізоляції та зовнішнього діаметра шайби (табл. 1).

Таблиця 1

## Закінчування робочій часті електрода

Тип				
I	II	III	IV	V
Кут намотування склоровінгу				
80 °		53 °		
				

## Висновки

Необхідно підкреслити, що для забезпечення точності параметрів керування навантаженням, а отже, підвищення ефективності досягнення поставлених цілей виробництва необхідна стабілізація режимів розряду при збільшенні їхньої кількості.

Для забезпечення стабільних параметрів усього технологічного процесу необхідний контроль режимів виділення енергії, стану об'єкта оброблення в міру його зміни, а також контроль стану системи енерговиділення обладнання.

## Список літератури

1. Taranenko, M. Ye.; Bohachova, T. B. & Taranenko, I. M.: Chapter 7 : Vibro-impulse loading – Perfectioning of metals processing with pressure. In: Modern Manufacturing Processes and Systems, Vol. 1: Fundamentals. Vrnjačka Banja (Serbia) : SaTCIP Publisher Ltd. & Belgrade (Serbia) : Faculty of Information Technology and Engineering (FIT), 2020, pp. 151-176. ISBN978-86-6075-069-5.

2. Тараненко, М. Е. Моделирование процесса взаимодействия импульсной струи с заготовкой при электрогидравлическом нагружении / М. Е. Тараненко. О. Г. Нарижний // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Харьков: ХАИ, № 92, 2021. – С. 66–77. ISSN 2071-1077. DOI: 10.32620/oikit.2021.92.06.

3. Тараненко, М. Е. Розвиток та особливості використання електрогидравлічного ефекту для штампування високоточних великогабаритних листових

деталей / М. Е. Тараненко, А. Г. Нарижний // Обработка металлов тиском : сб. науч. пр. ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2023. № 1 (52). – С. 107–117. DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)107.

### References

1. Taranenko, M. Ye.; Bohachova, T. B. & Taranenko, I. M. (2020). Chapter 7 : Vibro-impulse loading – Perfectioning of metals processing with pressure. Modern Manufacturing Processes and Systems. (Vol. 1). (pp. 151–176). *Fundamentals. Vrnjačka Banja*. Belgrade : Faculty of Information Technology and Engineering (FITI). ISBN978-86-6075-069-5 [in Serbia]

2. Taranenko, M. E. & Narizhniy, O. G. Modelirovanie protsessa vzaimodeistviya impulsnoi strui s zagotovkoi pri elektrogidravicheskom nagruzhении [Modelling of the process of interaction of a pulse jet with a workpiece under electrohydraulic loading]. *Open information and computer integrated technologies*. National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky. "Kharkiv Aviation Institute". – Kharkov: HAL, № 92, 2021. – pp. 66–77. ISSN 2071-1077. DOI: 10.32620/oikit.2021.92.06. [In Russian].

3. Taranenko M. E. & Naryzhnyi A. H. Rozvitok ta osoblivosti vikoristannya yelektrogidravlichnogo yefektu dlya shtampuvannya visokotochnikh velikogabaritnykh listovykh detalei [Rozvytok ta osoblyvosti vykorystannia elektrohavrlichnoho efektu dlia shtampuvannya vysokotochnykh velykohabarytrynykh lystovykh detalei]. *Obrobka metaliv tyskom : sb. nauch. pr. DHMA*. – Kramatorsk : DHMA, 2023. № 1 (52). – pp. 107–117. DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)107. [In Russian].

Надійшла до редакції 22.12.2023, розглянута на редколегії 25.12.2023

## **Maintaining the accuracy of control parameter values electro-hydraulic load during stamping with spatio-temporal control**

The article is devoted to ensuring the stability of the technological process of electrohydraulic stamping of thin-sheet large-sized parts. This process is realised on multi-contour EH presses equipped with the capabilities of space-time control of the workpiece load. This control ensures the production of high-quality parts and high technical and economic performance of the process.

The control parameters include the geometry of the press energy release zone, the loading sequence of the workpiece sections and the value of the inter-electrode distance. The first parameters change little under specified operating conditions. The third parameter is subject to change over a specified number of discharges due to cavitation and EDM erosion. Violation of the specified value of the interelectrode distance leads to a violation of the energy release mode and its loss.

As a result of the experiments, the mechanism of cavitation destruction of the high-voltage insulation of the working electrode was determined and a solution was proposed for the conditions of winding the high-voltage insulation with a glass fibre roving, as well as electrical insulation in the areas adjacent to the discharge zone.

Several variants of the design of the end part of the working electrode, which is still directly in the EG discharge zone, were experimentally investigated.

The ratio of the duration of the pre-discharge stage to the characteristic time of the discharge circuit was chosen as a criterion parameter of resistance to electrical erosion of the discharge edges. The duration of the pre-discharge stage was determined from the discharge voltage oscillograms.

According to the given dependences of the above ratio on the number of discharges, the best design from the considered options was determined.

The used value of this ratio for the selected design corresponds to ~ 2500 discharges at a voltage of 20...25 kV. This number of discharges is on average comparable to the operation during five shifts, after which it is necessary to restore the discharge edges of the electrode. To simplify the operations of changing electrodes, we propose a design in which the electrodes are fixed by clamping them with elastic washers.

It is concluded that the goal has been achieved: maintaining stable operation of the EG press with high technical and economic indicators of the entire technological process at a given quality of parts manufacturing.

It is concluded that the goal has been achieved: maintaining stable operation of the EG press with high technical and economic indicators of the entire technological process at a given quality of parts manufacturing.

Objective of the work – is to evaluate the effectiveness of the proposed technical solutions to increase the stability of the working electrodes and simplify their repair and restoration.

**Keywords:** stability of the discharge mode, electrohydraulic stamping, discharges, electrodes, sheet metal parts, experimental studies.

#### **Відомості про авторів:**

**Михайло Євгеневич Тараненко** – доктор технічних наук, професор, кафедра автомобілей та транспортної інфраструктури, Національний аеро-космічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: [m.taranenko@khai.edu](mailto:m.taranenko@khai.edu)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-6948>

**Кобріна Наталія Віталіївна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра автомобілей та транспортної інфраструктури, Національний аеро-космічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, тел.: (057) 788-41-07, e-mail: [n.kobrina@khai.ude](mailto:n.kobrina@khai.ude)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9499-2079>

#### **About the authors**

**Mykhaylo Ye. Taranenko** – Full Professor of Technical Sciences, Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-70, e-mail: [m.taranenko@khai.edu](mailto:m.taranenko@khai.edu)

**Nataliy Kobrina** – Candidate of Technical Sciences, Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-07, e-mail: [n.kobrina@khai.ude](mailto:n.kobrina@khai.ude)