

УДК 621.225

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.13

ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ VisSim У ВИВЧЕННІ ДИСЦИПЛІНИ «ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ГІДРОПРИВОДІВ»

Аврунін Г.А.¹, Мороз І.І.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У процесі викладання дисципліни «Проектування та випробування гідроприводів» для магістрів механічного факультету ХНАДУ вперше стало використовуватися математичне моделювання для дослідження динаміки об'ємного гідроприводу за допомогою застосованої програми VisSim. Об'єктом розрахунків динаміки гідроприводів є будівельно-дорожні та підйомно-транспортні машини.

Ключові слова: об'ємний гідропривід, моделювання динаміки гідроприводу, пакет VisSim.

Вступ

Поширення об'ємного гідроприводу (ОГП) у різних галузях народного господарства з урахуванням появи на ринку гідравлічних пристроїв цілої низки провідних світових фірм, вимагає відповідного методичного забезпечення студентів у навчанні. Сучасний етап розвитку ОГП характеризується передусім автоматизацією виробничих процесів гідрофікованих машин за рахунок запровадження досягнень електрогідроавтоматики, пошуком енергозберігаючих рішень на основі використання насосів і гідромоторів з регульованим робочим об'ємом, розширенням температурного діапазону робочої рідини (РР), широкою стандартизацією гідравлічних компонентів, зниженням рівня шуму і, звичайно, зменшенням металоемності гідропристроїв. Створення гідропристроїв високого технічного рівня базується на накопиченому теоретичному й експериментальному досвіді декількох поколінь фахівців у цьому виді техніки.

Досягнення потрібних від ОГП параметрів залежить від можливостей його роботи на підвищених навантаженнях (тисках), частотах обертання і температурах РР, що значною мірою визначається рівнем технології виготовлення, методик розрахунку, матеріалів і комплектуючих вузлів (антифрикційних матеріалів, ущільнень, РР, електроніки, датчиків, підшипників, рукавів високого тиску та ін.).

У ХНАДУ на механічному факультеті ведеться навчання студентів старших курсів дисциплін з вивчення конструкцій, методів розрахунку й експлуатації ОГП для будівельних, дорожніх, меліоративних та комунальних машин (БДМ), зокрема, «Проектування та випробування гідроприводів» (ПВГ)

для магістрів у галузі знань 13 – «Механічна інженерія» за спеціальністю за освітньою програмою 133 – «Галузеве машинобудування». Робоча програма з дисципліни ПВГ виконана відповідно до вимог, викладених у листі МОН України № 1/9-434 від 09 липня 2018 р. У цій програмі передбачено моделювання динамічних процесів у процесі розрахунків ОГП.

Метою викладання дисципліни ПВГ є підготовка фахівців до самостійного вирішення виробничих функцій та завдань діяльності в галузі проектування та випробування ОГП для БДМ з формуванням у студентів аналітичного мислення. Після вивчення дисципліни студент повинен знати гідравлічні принципові схеми сучасних колісних та гусеничних БДМ, основи проектування та методи випробувань ОГП для БДМ. Обсяг вивчення дисципліни ПВГ становить 180 год, зокрема аудиторні 32 години лекцій, 32 год лабораторних та практичних занять і 56 год самостійної роботи. Звітність студента з дисципліни складається зі складання лабораторних і практичних занять, курсової роботи й іспиту. Навчально-методичний комплекс дисципліни (УМКД ПВГ) містить робочу програму, методичні вказівки до виконання аудиторних занять і курсової роботи, фонд кваліфікаційних завдань (письмових запитань), пакети контролю залишкових знань і екзаменаційні білети, критерії оцінювання знань.

Аналіз публікацій

Вітчизняна навчальна література з ОГП [1–4] з'явилася на додаток до класичних уже книг Т.М. Башти, В.Н. Прокоф'єва, Д.Н. Попова та ін. Слід передусім виокремити навчальний посібник [2], у якому є матеріали за

розрахунком динаміки ОГП з дросельним і машинним регулюванням швидкості на основі використання пакету застосовних програм «SIAM». Фахівцями пропонуються також методи розрахунку ОГП за допомогою пакета «Simulink Mathworks» [5]. З точки зору моделювання динаміки ОГП на практиці та навчальних курсах величезний досвід накопичений у ХНТУ «ХПІ» проф. З.Я. Лур'є, який пропонує використовувати пакет PTV VisSim щодо вирішення цілого комплексу завдань для ОГП різного призначення [6, 7].

Для дидактичного забезпечення самостійної роботи студентів розроблені підручник [4] та сертифікований дистанційний конспект лекцій з дисципліни ПВГ на навчальному сайті ХНАДУ.

Мета і постановка завдання

Метою написання статті є підвищення рівня підготовки молодих фахівців для роботи в умовах сучасного рівня розвитку ОГП в будівельно-дорожніх, підйомно-транспортних і комунальних машинах. Завданням є ознайомлення фахівців та викладачів у галузі створення та експлуатації ОГП з методикою викладання дисципліни ПВГ для магістрів механічного факультету ХНАДУ, зокрема з динамічним моделюванням гідросистем за допомогою прикладної програми PTV VISSIM. Матеріали статті рекомендовані для застосування магістрами в дипломних роботах з метою розрахунків динаміки ОГП БДМ різного призначення.

Основи методики розрахунку динаміки гідроприводу

Моделювання динамічних процесів ОГП БДМ використовуються магістрами в курсових та дипломних роботах. Попередньо виконують статичні розрахунки, за допомогою яких вибирають конкретні гідропристрої та визначають ККД ОГП. Ці розрахунки також зручно робити за допомогою програми VisSim. Для магістрів підготовлені більше ніж 60 варіантів завдань для розрахунків ОГП з гідроциліндрами та гідромоторами, які відрізняються зовнішнім зусиллям та крутним моментом, часом переміщення гідроциліндрів та швидкістю гідромоторів, частотою обертання приводних двигунів та довжиною гідропроводів.

Створення методик розрахунку окремих вузлів і гідропристроїв та аналіз динаміки ОГП в експлуатації вимагають від сучасного фахівця глибоких знань у галузі фізики,

теоретичної механіки, матеріалознавства, машинознавства і, звичайно ж, математики. Зокрема потреба в математичному апараті може бути обґрунтована на прикладі низки розрахункових методик, що застосовуються в ОГП. Насамперед слід зазначити необхідність знання диференціального обчислення, що є основою математичних моделей ОГП. Можливість використання пакета динамічного моделювання VisSim у навчальному процесі дозволило істотно розширити обсяг інформації про динамічні процеси, що відбуваються, в ОГП різного призначення.

Розглядаючи математичні моделі ОГП можна отримати значення тиску, переміщення та швидкості гідродвигуна залежно від часу перехідного процесу. В основі математичних моделей ОГП лежать рівняння нерозривності та закони Паскаля для РР і Ньютона для механічної взаємодії системи «гідродвигун-навантаження робочого органа». Для ознайомлення з основами пакета VisSim студенти використовують відповідні методичні рекомендації [7], які також розроблені в ХНАДУ на кафедрі БДМ.

На рис. 1 наведені розрахункові схеми динаміки ОГП з гідроциліндром (а) та гідромотором (б) з позначками необхідних параметрів, які є типовими для приводів пересування, рульового керування та технологічного (робочого) обладнання машин різного призначення.

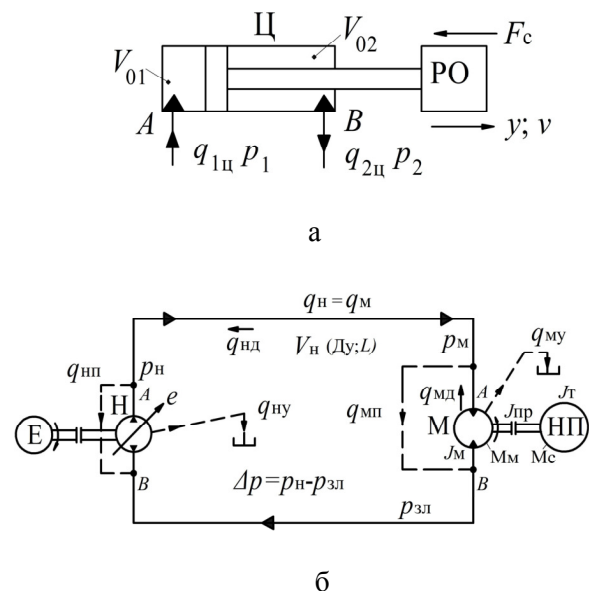


Рис. 1. Розрахункові схеми динаміки ОГП з гідроциліндром (а) і гідромотором (б)

Для ОГП з гідроциліндром розрахункові рівняння для визначення тиску, швидкості й переміщення мають вигляд [2]

$$\frac{dp_1}{dt} = E \frac{q_{1Ц} - A_{П} v_z}{V_{01} + A_{П} y_z}; \quad p_1 = \int_0^{t_K} \dot{p}_1 dt; \quad \frac{dp_2}{dt} = \quad (1)$$

$$= E \frac{A_{Ш} \cdot v_z - q_{2Ц}}{V_{02} + A_{Ш} \cdot y_{z1}}; \quad p_2 = \int_0^{t_K} \dot{p}_2 dt,$$

$$\dot{v}_z = \frac{1}{m} [A_{П} p_1 - A_{Ш} p_2 - F_C - F_{ж.тр} - F_{тр}] =$$

$$= \frac{1}{m} [F^* - F_C]; \quad v_z = \int_0^{t_K} \dot{v}_z dt; \quad y_{z1} = \int_0^{t_K} v_z dt, \quad (2)$$

де $q_{1Ц}$ і $q_{2Ц}$ – витрати РР, що поступають і відводяться з гідроциліндра; $A_{П}$ і $A_{Ш}$ – площі поршня та штока гідроциліндра відповідно; p_1 і p_2 – тиски на вході й виході з гідроциліндра; v_z і y_z – швидкість і переміщення поршня гідроциліндра; E – приведений модуль пружності РР, V_{01} і V_{02} – початкові об'єми РР у порожнинах гідроциліндра;

$[A_{П} p_1 - A_{Ш} p_2 - F_{ж.тр} - F_{тр}] = F^*$ – позначення; m – приведена до осі штока гідроциліндра маса рухливих елементів F_C , $F_{ж.тр}$ і $F_{тр}$ – сили опору руху штока, в'язкого тертя й напівсухого тертя відповідно.

Розрахункові формули для визначення тиску в лінії нагнітання насоса і частоти обертання гідромотора мають вигляд

$$\frac{dp_H}{dt} \frac{V_{0H}}{E} = W_H \omega_H - p_H C_{H.уп} - W_M \omega_M - p_H C_{M.уп}, \quad (3)$$

$$p_H = \int_0^t \frac{E}{V_{0H}} \cdot [W_H \omega_H - W_M \omega_M - p_H (C_{H.уп} + C_{M.уп})] dt,$$

$$M_M - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_M}{dt}; \quad W_M \cdot p_M \cdot \eta_{МГМ} - M_C =$$

$$= J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_M}{dt}, \quad (4)$$

$$\omega_M = \int_0^t \frac{1}{J_{\Sigma}} [W_M \cdot p_M \cdot \eta_{МГМ} - M_C] dt,$$

де p_H и p_M – тиск нагнітання насоса й гідромотора (за умови коротких довжин трубопроводів приймають $p_M \approx p_H$); V_{0H} – об'єм РР у вихідній порожнині насоса (трубопроводі між насосом і гідромотором і «мертвих» об'ємів останніх); $W_H = V_{PH} / 2\pi$ і

$W_M = V_{PM} / 2\pi$ – характерні об'єми насоса й гідромотора з робочим об'ємом V_{PH} і V_{PM} , см³/рад; $\omega_H = 2\pi \cdot n_H / 60$ – кутова швидкість насоса, рад/с, (n_H – частота обертання насоса, хв⁻¹); $C_{H.уп}$ и $C_{M.уп}$ – коефіцієнти зовнішніх та внутрішніх витоків РР у насосі ($\Delta q_{HУ}$; $\Delta q_{HП}$) і гідромоторі ($\Delta q_{MУ}$; $\Delta q_{MП}$) відповідно, см³/с.МПа; M_C і $M_M = W_M \cdot p_M \cdot \eta_{МГМ}$ – момент опору (навантаження від робочого органа [Н.м]) і крутного моменту, що розвивається гідромотором з гідромеханічним ККД ($\eta_{МГМ}$), Н.м/рад; J_{Σ} – сумарний момент інерції гідромотора й робочого органа, приведений до вала гідромотора, Н.м.с²/рад².

У математичній моделі робляться такі допущення: крутний момент опору робочого органа, що створюється гідромотором ОГП, приймається постійним; хвиливі процеси в трубопроводах не враховуються через їх незначну протяжність; тиск на виході гідромотора (зливі) приймається постійним. Змінними параметрами в ОГП можуть бути стисливість РР, об'ємний ККД гідромотора та коефіцієнт витрати насоса; гідромеханічний ККД гідромотора; момент інерції гідромотора та приєднаних до нього мас робочого органа і швидкодія насоса. Варіюючи цими параметрами, студент може провести самостійний аналіз динаміки ОГП різного типу – з гідроциліндром або гідромотором.

Як приклад, розглянемо динамічні характеристики як залежності зміни тиску гідромотора на пусковому режимі для ОГП потужністю 300 кВт з математичним моделюванням за допомогою пакета обчислювальних блоків VisSim замість «SIAM» [2]. Результати розрахунків наведені на осцилограмах (рис. 2) і вказують на те, що зниження часу виходу на максимальну витрату насоса дозволяє зменшити ривки тиску з 73 до 51 МПа. Таке істотне зниження коливань тиску є відчутним з точки зору зниження динамічних навантажень і підвищення довговічності насоса і гідромотора ОГП. Слід зазначити, що найбільш зручним способом контролю часу виходу на максимальну витрату насоса й характеру коливань тиску виявляються залежності зміни витоків $Q_{УТ}$ насоса або гідромотора від часу роботи ОГП. На рисунках чітко фіксується час виходу на максимальну витрату насоса за допомогою контролю часу стабілізації витоків $Q_{УТ}$: на

режимі (а) близько 0,24 с, на режимі (б) близько 0,01 с.

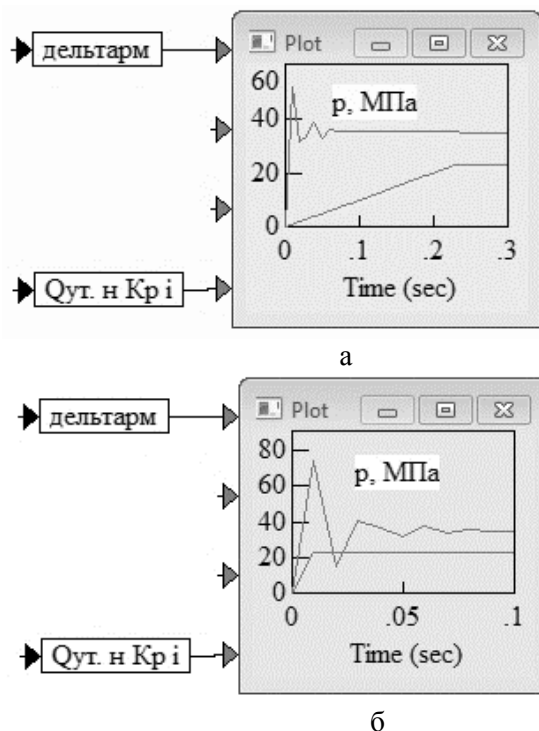


Рис. 2. Тиск (а) і витрати в насосі (б) за умови різного часу виходу на максимальну витрату

Висновки

Використання пакета VisSim дозволяє моделювати динамічні процеси в гідроприводах БДМ та вести пошук рішень, спрямованих на підвищення якості їх роботи. Моделювання динаміки ОГП у вивченні дисципліни «Проектування та випробування гідроприводів» дозволяє підвищити рівень підготовки молодих фахівців.

Література

1. Григоров О.В. Гідравлічний привод підйомнотранспортних, будівельних та дорожніх машин: навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – 264 с.
2. Расчет, проектирование и эксплуатация объемного гидропривода: учебное пособие / З.Л. Финкельштейн и др. – Киев: НТУУ «КПИ», 2006. – 216 с.
3. Ермолаев В.Я. Гидравлика, гидро- и пневмопривод: учебно-методическое пособие. – Харьков: ХНАДУ, 2008. – 240 с.
4. Аврун Г.А., Кириченко І.Г., Самородов В.Б. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин: підручник / під ред. Г.А. Авруніна. – Харків: ХНАДУ, 2016. – 438 с.
5. Моделирование гидропривода. Simulink Library Browser. www.mathworks.com. www.simatlab.

6. Лурье З.Я., Цента Е.Н., Панченко А.И. Динамика двухмерной системы управления мехатронного гидроагрегата навесным оборудованием трактора // Промислова гідраліка і пневматика. – 2017. – № 3(57). – С. 29–46.
7. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Динамика гидропневмосистем» для студентов специальностей 131 «Прикладная механика» (специализация 131.10 «Гидропневмоавтоматика нефтегазового оборудования»), 133 «Отраслевое машиностроение» (специализация 133.03 «Машины и механизмы нефтегазовых промыслов») / сост.: З.Я. Лурье, А.И. Гасюк, Е.Н. Цента, Г.А. Аврунин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2019. – Ч. 1. – 60 с.

References

1. Hrygorov O.V. Hidravlichnyy pryvid pidyomnotransportnykh, budivel'nykh ta dorozhnykh mashyn: navchal'nyy posibnyk. – Kharkiv: NTU «KHPI», 2005. – 264 s.
2. Rozrakhunok, proektuvannya ta ekspluatatsiya ob'yemnoho hidropryvodu: navchal'nyy posibnyk / Z.L. Finkelshteyn, O.M. Yakhno, V.H. Cheban, Z. YA. Lur'ye, I.A. Chekmasova. – Kyiv: NTUU «KPI», 2006. – 216 s.
3. Yermolayev V.YA. Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvid: navchal'no-metodychnyy posibnyk. – Kharkiv: Vydavnytstvo KHNADU, 2008. – 240 s.
4. Avrunin H.A., Kyrychenko I.H., Samorodov V.B. Hidravlichne obladnannya budivel'nykh ta dorozhnykh mashyn: pidruchnyk / pid red. H.A. Avrunina. – Kharkiv: KHNADU, 2016. – 438 s.
5. Modelirovanie gidroprivoda. Simulink Library Browser. www.mathworks.com. www.sl-matlab.
6. Lurye Z.YA., Tsenta E.N., Panchenko A.I. Dinamika dvukhmernoy systemy upravleniya mekhatronnogo gidroagregata navesnym oborudovaniem traktora // Promuslova gidravlika i pnevmatika. – 2017. – № 3(57). – P. 29–46.
7. Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam po kursu «Dinamika gidropnevmosistem» dlya studentov spetsialnostey 131 «Prikladnaya mekhanika» (spetsializatsiya 131.10 «Gidropnevmoavtomatika neftegazovogo oborudovaniya»), 133 «Otraslevoe mashinostroenie (spetsializatsiya 133.03 «Mashiny s mekhanizmy neftegazovykh promyslov») / sost.: Z.YA. Lure, A.I. Gasuk, E.N. Tsenta, G.A. Avrunin. – Kharkov: HNTU «KHPI», 2019. – Ch. 1. – 60 p.

Аврунін Григорій Аврамович, к.т.н., доцент, +380 (050) 596-62-53, ORCID 0000-0002-0191-3149, griavrunun@ukr.net, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

Мороз Ірина Іванівна, старший викладач, +380 (050) 700-67-95, ORCID 0000-0001-5950-2089, irinamoroz25.01@ukr.net, Харківський національ-

ний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

Use of dynamic modeling of VisSim in teaching the discipline «Design and Testing of Hydraulic Fluid Power»

Abstract. The widespread use of hydraulic fluid drive in modern road-building and hoisting machines with electrohydroautomation and energy saving requires an increase in the level of education of future specialists for successful work at operation and modernization of the domestic fleet. **Problem.** Increasing the level of training masters on the basis of familiarization with modern means of analyzing the dynamics of hydraulic fluid drives, corresponding to the curriculum of the discipline «Design and testing of hydraulic drives» at the mechanic faculty of the Kharkiv National Auto-Road University. **Method.** A review of educational literature and the mathematical models of hydraulic fluid drive of reciprocating and rotational motion is made. The package of dynamic modeling VisSim for solving the problems of dynamics in hydraulic fluid drives of road construction, hoisting and transport, utility and land reclamation machines was used on a practical example. **Practical results.** The study shows a mathematical model of hydraulic fluid drive with a closed circuit of working fluid circulation, including a pump with an adjustable working volume and a hydraulic motor with a constant working volume, the important effect of the pump output time on the maximum flow on the pressure fluctuations in the hydraulic system. **Conclusion.** The discipline «Design and testing of hydraulic actuators» is provided with methodological manuals, information about modern hydraulic devices and hydraulic drives of mobile machines. For the first time, mathematical modeling was used to study the dynamics of hydraulic fluid power using the VisSim application program. Mathematical modeling of hydraulic fluid drive is recommended for use by students when performing course and diploma works. **Key words:** hydraulic fluid drive, hydraulic device, hydraulic drive dynamics, VisSim package.

Avrunin Grigory, PhD, associate professor, tel. +380 (050) 596-62-53, ORCID 0000-0002-0191-3149, griavrunin@ukr.net, Kharkovskii-nacionalnyi-avtomobilno-dorozhnyi-universitet, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Moroz Irene, senior teacher, tel. +380 (050) 700-67-95, ORCID 0000-0001-5950-2089, irinamoroz25.01@ukr.net, Kharkovskii-nacionalnyi-avtomobilno-dorozhnyi-universitet, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Использование динамического моделирования VisSim в изучении дисциплины «Проектирование и испытания гидроприводов»

Введение. Широкое внедрение объемного гидропривода в строительно-дорожных и подъемно-транспортных машинах импортного производства с современными системами электрогидроавтоматики и энергосбережения требует повышения уровня образования молодых специалистов для успешной работы при эксплуатации техники и модернизации отечественных машин. **Проблема.** Повышение уровня подготовки магистров на основе ознакомления с современными средствами анализа динамики объемного гидропривода, соответствующих рабочей учебной программе дисциплины «Проектирование и испытания гидроприводов» на механическом факультете Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. **Метод.** Проведен обзор учебной литературы и рассмотрены математические модели объемного гидропривода возвратно-поступательного и вращательного движения. Использован на практическом примере пакет динамического моделирования VisSim для решения задач динамики в объемных гидроприводах строительно-дорожных, подъемно-транспортных, коммунальных и мелиоративных машин. **Практические результаты.** Показано по результатам исследования математической модели объемного гидропривода с замкнутой цепью циркуляции рабочей жидкости, включающего насос с регулируемым рабочим объемом и гидромотор с постоянным рабочим объемом, важное влияние времени выхода насоса на максимальную подачу на колебания давления в гидросистеме. **Заключение.** Дисциплина «Проектирование и испытания гидроприводов» обеспечена методическими пособиями, информацией о современных гидроустройствах и гидроприводах мобильных машин. Впервые стало использоваться математическое моделирование для исследования динамики объемного гидропривода с помощью прикладной программы VisSim. Математическое моделирование объемного гидропривода рекомендовано к использованию студентами при выполнении курсовой и дипломной работ. **Ключевые слова:** объемный гидропривод, гидроустройство, динамика, пакет VisSim.

Аврунин Григорий Аврамович, к.т.н, доцент, +380 (050) 596-62-53, ORCID 0000-0002-0191-3149, griavrunun@ukr.net, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002.

Мороз Ирина Ивановна, старший преподаватель, +380 (050) 700-67-95, ORCID 0000-0001-5950-2089, irinamoroz25.01@ukr.net, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002.