

*А. П. Кушнір*¹, канд. техн. наук, доцент, *В. М. Оксентюк*², канд. техн. наук,
*І. П. Кравець*¹, канд. техн. наук, доцент, *М. В. Войцех*¹

(¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,

²Національний університет "Львівська політехніка" СКБ електромеханічних систем)

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОВОРОТОМ ЛЮЛЬКИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДЙМАЧА З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТІЛИ

Стріла пожежного автопідіймача не є абсолютно жорсткою. Тому через пружні деформації стріли, недосконалість виготовлення механічних елементів та їх з'єднань, неефективну роботу системи керування, реактивну дію вогнегасних речовин при переміщенні люльки виникають пружні коливання. Для демпфування пружних коливань в горизонтальній площині синтезовано, методом узагальненого характеристичного полінома, позиційну систему підпорядкованого регулювання поворотом платформи з урахуванням пружних властивостей стріли з люлькою. Дослідження на цифровій моделі показали, що ця система дає змогу забезпечити аперіодичний перехідний процес повороту люльки і низьку чутливість, в усталеному режимі, до дії збурень. Це значно підвищує безпеку і покращує роботу рятувальників.

Ключові слова: пожежний автопідійомник, механізм повороту платформи, комп'ютерна модель, метод узагальненого характеристичного полінома.

А. П. Кушнір, В. М. Оксентюк, І. П. Кравець, М. В. Войцех

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ ЛЮЛЬКИ ПОЖАРНОГО АВТОПОДЪЕМНИКА С УЧЕТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ СТРЕЛЫ

Стрела пожарного автоподъемника не является абсолютно жесткой. Поэтому через упругие деформации стрелы, несовершенство изготовленных механических элементов и их соединений, неэффективную работу системы управления, реактивное действие огнетушащих веществ при перемещении люльки возникают упругие колебания. В данной статье для демпфирования упругих колебаний в горизонтальной плоскости синтезировано, методом обобщенного характеристического полинома, позиционную систему подчиненной регулирования поворотом платформы с учетом упругих свойств стрелы с люлькой. Исследование на цифровой модели показали, что данная система позволяет обеспечить аперіодический переходный процесс поворота люльки и низкую чувствительность, в установившемся режиме, к действию возмущений. Это значительно повышает безопасность и улучшает работу спасателей.

Ключевые слова: пожарный автоподъемник, механизм поворота платформы, компьютерная модель, метод обобщенного характеристического полинома.

V. M. Oksentyuk, A. P. Kushnir, I. P. Kravets, M. V. Voitsekh

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM SYNTHESIS OF FIRE LIFT'S BASKET TURNING WITH TAKING INTO ACCOUNT ELASTIC PROPERTIES OF AN ARROW

The fire lifts arrow is not absolutely rigid. Therefore, through the resilient deformation of the arrow, inadequate production of mechanical elements and their compounds, ineffective control systems, fire extinguishing agents reactive force when moving a basket having resilient vibrations. The position slave control system by the turn of tube taking into account elastic properties of arrow for the elastic oscillation damping in a horizontal plane is synthesized by the method of the generalized characteristic polynomial in this article. It enables virtually aperiodic transient process of moving cradle and low sensitivity to the action of perturbations what significantly increases security and improves rescuers' work.

Key words: fire lifts, platform's rotation mechanism, computer model, method of the generalized characteristic polynomial.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції в проектуванні зумовлюють появу великої кількості висотних багатофункціональних споруд (житлових, адміністративних, промислових). Такі об'єкти мають ряд переваг над іншими, але поряд із перевагами, попри їх оснащення сучасними системи протипожежного захисту, через свої особливості, можуть стати джерелом підвищеної небезпеки, пов'язаної із загрозою виникнення пожежі, різного роду аварій і т.д. Тому жодне, навіть найсучасніше технічне устаткування, яким обладнані висотні будинки, не може компенсувати збільшення ризику виникнення пожеж, спричинених ростом соціальної та технічної складових. Для проведення рятувальних робіт на значних висотах та подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі використовують спеціальні сучасні пожежні автодрабини та автопідіймачі. Найбільш відомими у світі виробниками пожежних автопідіймачів є фінська компанія “Бронто-Скайліфт”, фірми “Івеко”, “Фаун”, “Магірус” та інші.

Робота рятувальників з використанням підйимальної техніки на значних висотах супроводжується значним ризиком для життя, як для них самих, так і для потерпілих. Ця обставина підсилюється ще й тим, що стріла підйимального механізму не є абсолютно жорсткою. Тому через пружні деформації стріли, недосконалість виготовлення механічних елементів та їх з'єднань, неефективну роботу системи керування, реактивну дію вогнегасних речовин при переміщенні люльки виникають пружні коливання. Крім того, усі автопідіймачі і автодрабини використовуються на відкритому повітрі, тому на люльку діє також вітрове навантаження. Це значно ускладнює роботу рятувальників, а деколи навіть зводить нанівець усі їхні зусилля. Підйимальна техніка, що використовується в ДСНС України, повинна відповідати вимогам безпеки та захисним заходам ДСТУ [1], зокрема пружні коливання люльки як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах, повинні бути якнайменшими.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На сьогодні майже усі вітчизняні автодрабини і автопідіймачі не мають автоматичної системи стабілізації положення люльки. Стабілізація люльки здійснюється за допомогою механічних пристроїв [2] та оператора, а якість керування залежить лише від професійності оператора. До основних недоліків такої стабілізації слід віднести відсутність зворотних зв'язків у системі переміщення люльки, що робить стабілізацію люльки в заданих координатах майже неможливою. Демпфування пружних коливань люльки завдяки механічним пристроям є малоефективним. Перспективним способом демпфування коливань, а отже стабілізації люльки в заданих координатах за умови відпрацювання завдання, є використання системи автоматичного керування (САК), що робить роботу рятувальників більш безпечною та ефективною. Така система повинна відпрацьовувати завдання з високою точністю і повинна забезпечувати демпфування пружних коливань люльки в обох площинах. Деякі системи автоматичної стабілізації стріли для відповідних приводів використовуються на автодрабинах іноземного виробництва. Так у автодрабинах, які випускає компанія MAGIRUS GmbH, запропонована система комп'ютерної стабілізації комплексу стріли, яка дає змогу демпфувати коливання стріли за допомогою гідравлічної протидії при поривах вітру [3]. Питання демпфування пружних коливань у вертикальній площині детально розглянуто у роботі [4]. Запропоновано одну із САК підймання люльки і відповідним чином синтезовано її. У той же час демпфуванню пружних коливань люльки в горизонтальній площині приділяється недостатньо уваги.

Постановка задач дослідження. У цій статті для демпфування пружних коливань в горизонтальній площині пропонується синтезувати позиційну систему підпорядкованого регулювання (СПР) поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли, яка б дала змогу забезпечити необхідні динамічні та статичні характеристики переміщення люльки за умови дії на неї керуючих та збурюючих впливів і, тим самим, підвищити ефективність роботи рятувальників в реальних умовах їх роботи.

Виклад матеріалу дослідження. Процес синтезування СПР передбачає математичну модель об'єкта керування. У цьому випадку – це математична модель виконавчого двигуна і математична модель механізму повороту люльки з урахуванням пружних деформацій стріли. В роботі [5] для забезпечення високих статичних і динамічних показників було обґрунтовано

необхідність заміни механічної редукторної системи повороту платформи пожежного автопідіймача електромеханічною безредукторною, побудованою на базі моментного вентиляного двигуна. Цей двигун забезпечує поєднання здатності високоточної роботи на низьких швидкостях з необхідністю розвивати великий момент на валу і дає можливість недовготривалої роботи останнього навіть у режимі короткого замикання. Відсутність редуктора дає змогу значно спростити механічну частину привода, позбутися люфтів і, як наслідок, виникнення динамічних ударів під час пуску, зупинки чи дії навантаження на опорно-поворотний механізм та суттєво підвищити жорсткість механізму.

Математичний опис моментного вентиляного двигуна є складним і громіздким до використання у математичному апараті для синтезування різноманітних систем керування. У роботі [6] було доведено правомірність заміни математичного опису вентиляного двигуна на колекторний двигун постійного струму у випадку, для якого важливим є збіг статичних і динамічних характеристик залежності моменту та кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання. Математична модель колекторного двигуна є загальновідомою [7], зручною, широко адаптованою і дає змогу отримувати необхідні рішення різноманітних математичних задач синтезу САК без ускладнення процесу математичного опису.

Математична модель механізму переміщення люльки в горизонтальній площині будується на основі кінематичної схеми і була запропонована у роботі [8] для приростів координат та зовнішніх впливів. Без урахування редуктора вона має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M_1(p) - a_1(p)\omega_1(p) - [M_{12}(p) - b_{12}(\omega_2(p) - \omega_1(p))] &= J_1 p \omega_1(p), \\ M_{12}(p) &= \frac{C_{12}}{p} (\omega_1(p) - \omega_2(p)), \\ M_{12}(p) + b_{12}(\omega_1(p) - \omega_2(p)) \pm F_s(p)L &= J_2 p \omega_2(p), \\ \varphi_n(p) &= \frac{1}{p} \omega_2(p), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де J_1, J_2 – сумарні моменти інерції першої та другої мас відповідно; M_1 – момент, що діє зі сторони двигуна; $F_s(p)$ – горизонтальна складова збурень, які обумовлені силою вітру і реактивним зусиллям від струменя води; C_{12} – коефіцієнт пружності деформації згину; b_{12} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя у пружній стрілі; a_1 – коефіцієнт зовнішнього в'язкого тертя; $\omega_1(p)$ – кутова швидкість двигуна; $M_{12}(p)$ – момент пружної деформації стріли в горизонтальній площині; $\omega_2(p)$ – кутова швидкість люльки, $\varphi_n(p)$ – кут повороту люльки; p – оператор Лапласа.

Оскільки, пропонується використання безредукторного привода, то величина коефіцієнта зовнішнього в'язкого тертя a_1 буде малою і його вплив на систему буде незначний, а отже під час синтезування СПР ним можна знехтувати.

Система підпорядкованого керування СПР швидкістю електропривода [7] традиційно будується як двоконтурна система з контурами регулювання струму та швидкості обертання. Враховуючи достатньо малу величину електромагнітної сталої часу якірного кола T_π в контурі регулювання струму, порівняно з механічними сталими часу, у компенсації T_π немає необхідності, тому в подальшому аналізі цей контур виключається зі складу СПР.

Визначити момент пружної деформації стріли досить проблематично. Тому реалізуємо цю СПР поворотом люльки без контура регулювання моменту пружної деформації $M_{12}(p)$. Таким чином СПР поворотом люльки будемо як триконтурну СПР з контурами регулювання швидкостей обертання платформи, люльки і кута повороту люльки.

Для синтезування регуляторів кутової швидкості двигуна, люльки і положення люльки за малу некомпенсовану сталу часу T_μ прийнято суму сталих часу широтно-імпульсного перетворювача T_{np} та якірного кола T_π ($T_\mu = T_{np} + T_\pi = 0,011$ с). Тоді передавальна функція електричної частини привода має вигляд:

$$W_{ел.нр}(p) = K_{ел}/(T_{\mu}p + 1). \quad (2)$$

На основі вище сказаного і математичних моделей моментного вентильного двигуна та механізму повороту люльки (1) будуюмо структурну схему позиційної СПР поворотом люльки з врахуванням пружних властивостей стріли (рис. 1). На рисунку прийнято такі позначення: $W_{pn}(p)$ – передавальна функція регулятора положення люльки; $W_{пу1}(p)$, $W_{пу2}(p)$ – передавальні функції регуляторів кутової швидкості двигуна і люльки відповідно; $K_{у1}$, $K_{у2}$, K_n – коефіцієнти передачі давачів швидкості першої маси (двигуна), другої маси (люльки) та давача положення.

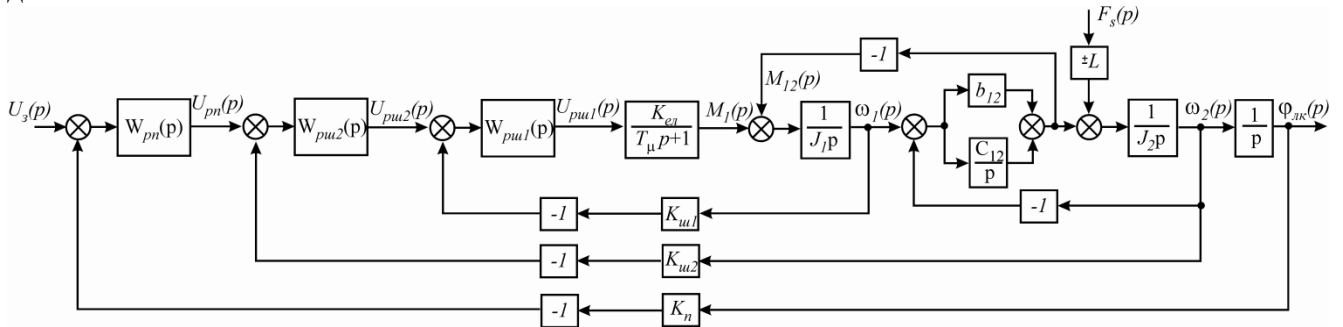


Рисунок 1 – Структурна схема позиційної СПР поворотом люльки з врахуванням пружних властивостей стріли

Передавальна функція $W_n(p) = \phi_{лк}(p)/U_3(p)$ позиційної СПР поворотом люльки з врахуванням пружних властивостей стріли (рис. 1) має вигляд:

$$W_n(p) = \frac{W_{pn}(p)W_{пу2}(p)W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)(b_{12}p + C_{12})}{J_1p^2(J_2p^2 + b_{12}p + C_{12}) + (b_{12}p + C_{12})J_2p^2 + W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)K_{у1}p(J_2p^2 + b_{12}p + C_{12}) + \rightarrow} \rightarrow + W_{пу2}W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)(b_{12}p + C_{12})K_{у2}p + W_{pn}(p)W_{пу2}(p)W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)(b_{12}p + C_{12})K_n. \quad (3)$$

Як видно з виразу (3) якість перехідного процесу вихідної координати $\phi_{лк}(p)$ буде залежати не лише від полюсів системи, але й від нулів. Тому синтез такої позиційної СПР будемо здійснювати методом узагальненого характеристичного полінома, суть якого розглянуто в [7]. Цей метод дає змогу врахувати нулі передавальної функції під час синтезування системи керування і налаштувати її на будь-яку стандартну форму перехідного процесу вихідної координати регулювання. Крім того, цей метод робить систему стійкою до координатних збурень. Дослідження показали, що декомпозиційний варіант синтезу такої двомасової системи не дає можливості побудувати триконтурну СПР, тому застосуємо інтегральний варіант синтезу.

Представимо узагальнений характеристичний поліном такої СПР поліномом третього порядку. Для цього помножимо і розділимо першу, другу і третю складові характеристичного полінома передавальної функції (3) на оператор p . Після цього узагальнений характеристичний поліном отримаємо шляхом почленного ділення складових характеристичного полінома на вираз чисельника. Таким чином, характеристичний поліном $H_n(p)$ формується з урахуванням полінома чисельника передавальної функції (16) і має вигляд:

$$H_n(p) = \frac{\omega_0^3}{K_n} \left[\frac{J_1(J_2p^2 + b_{12}p + C_{12}) + (b_{12}p + C_{12})J_2}{W_{pn}(p)W_{пу2}(p)W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)(b_{12}p + C_{12})p} p^3 + \rightarrow \right]$$

$$\rightarrow + \frac{K_{u1}(J_2 p^2 + b_{12} p + C_{12})}{W_{pn}(p)W_{pu2}(p)(b_{12} p + C_{12})p} p^2 + \frac{K_{u2}}{W_{pn}(p)} p + K_n \Big], \quad (4)$$

де ω_0 – середньгеометричний корінь стандартної форми характеристичного полінома.

Прирівняємо вирази при однакових степенях оператора p виразу (4) і будь-якої стандартної форми розподілу коренів на комплексній площині третього порядку ($n = 3$)

$$H_{cm}(p) = p^3 + \alpha_1 \omega_0 p^2 + \alpha_2 \omega_0^2 p + \alpha_3 \omega_0^3.$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти вибраної стандартної форми характеристичного полінома.

Отримаємо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_0^3 J_1 (J_2 p^2 + b_{12} p + C_{12}) + J_2 (b_{12} p + C_{12})}{K_n W_{pn}(p) W_{pu2}(p) W_{pu1}(p) W_{en}(p) (b_{12} p + C_{12}) p} &= 1, \\ \frac{\omega_0^3 K_{u1} (J_2 p^2 + b_{12} p + C_{12})}{K_n W_{pn}(p) W_{pu2}(p) (b_{12} p + C_{12}) p} &= \alpha_1 \omega_0, \\ \frac{\omega_0^3 K_{u2}}{K_n W_{pn}(p)} &= \alpha_2 \omega_0^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) з урахуванням виразу (2) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} W_{pu1}(p) &= \frac{\alpha_1 \omega_0 (T_\mu p + 1)}{K_{u1} K_{en}} \left[J_1 + \frac{J_2 (b_{12} p + C_{12})}{J_2 p^2 + b_{12} p + C_{12}} \right], \\ W_{pu2}(p) &= \frac{\alpha_2 \omega_0 K_{u1}}{\alpha_1 K_{u2}} \left(\frac{J_2 p}{b_{12} p + C_{12}} + \frac{1}{p} \right), \\ W_{pn}(p) &= \frac{\omega_0 K_{u2}}{\alpha_2 K_n} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

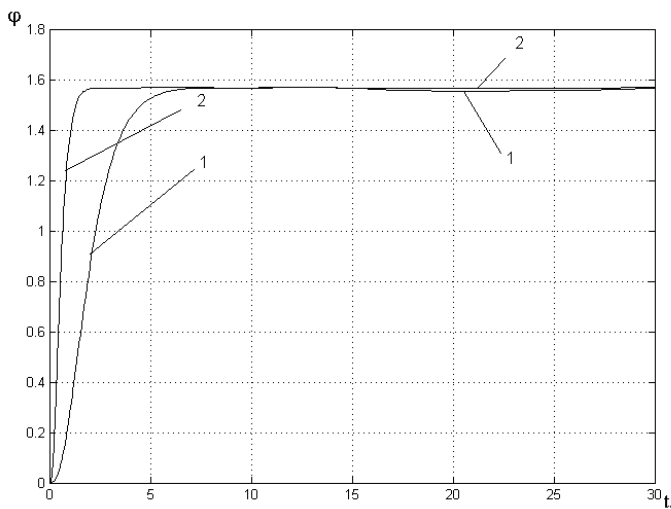


Рисунок 2. – Перехідний процес СПР поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли (крива 1 – $\omega_0 = 1,429 \text{c}^{-1}$, крива 2 – $\omega_0 = 5 \text{c}^{-1}$)

На цифровій моделі проводилися дослідження синтезованої триконтурної СПР поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли за умови налаштування її на стандартну біноміальну форму ($\alpha_1 = 3; \alpha_2 = 3$) та повороті люльки на 90° ($\varphi = 1,571 \text{c}^{-1}$), якщо довжина стріли $L_{стр} = 30 \text{м}$ і кут підйому стріли $\alpha = 70^\circ$. Результати моделювання перехідного процесу руху люльки підйимального механізму при пуску та зміні навантаження показано на рис. 2 (крива 1). Величина $\omega_0 = 1,429 \text{c}^{-1}$ вибрана виходячи з вимог безпечного транспортування люльки з людьми (прискорення не більше $0,5 \text{м/с}$). Слід відмітити, що під час моделювання в регуляторі швидкості першої маси $W_{pu1}(p)$ був реалізований

реальний, а не ідеальний диференціатор зі сталою часу $0,01 \text{с}$. Як видно з рис. 2, форма перехідного процесу повороту люльки φ_n відповідає стандартній біноміальній формі на яку налаштували систему. Коли $t = 15 \text{с}$, змодельовано дію збурення (порив вітру, подача вогнегасної речовини по сухотрубках). Як бачимо синтезована СПР в статичному режимі є нечутливою (прак-

тично астатичною) до дії збурення. В той же час наявна незначна ($\approx 1,4\%$) динамічна похибка, величина якої залежить від $\omega_{оп}$. На рис. 2 (крива 2) показано перехідний процес руху люльки коли величина $\omega_0 = 5\text{с}^{-1}$. Як видно з рисунка динамічна похибка майже дорівнює нулю. Отже із збільшенням ω_0 динамічна похибка прямує до нуля. Однак із збільшенням швидкодії системи транспортування людей в люльці стає небезпечним. Тому необхідно пуск здійснювати при малій величині ω_0 , а при стабілізації люльки в заданому положенні необхідно збільшити величину ω_0 шляхом відповідного перемикавання в системі керування.

Висновки

В статті синтезовано позиційну триконтурну СПР поворотом люльки з врахуванням пружних властивостей стріли, без введення зворотного зв'язку за пружним моментом, яка дає змогу забезпечити аперіодичний перехідний процес переміщення люльки з заданою швидкістю і стабілізувати її в заданій точці. Крім того, при дії збурюючих впливів система є нечутливою в статичному режимі. Величину динамічної похибки можна зменшити збільшуючи значення $\omega_{оп}$. Усе це дає змогу ефективно виконувати роботу рятувальниками і робить її більш безпечною.

Список літератури:

1. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT) : ДСТУ EN 14043:2008. – [Чинний від 2008-12-26]. – К. ; Держспоживстандарт України, 2008. – 176 с. – (Національний стандарт України)
2. Дівеєв Б. М. Застосування різного типу маятникових динамічних гасників коливань / Дівеєв Б. М., Коваль Т. Б., Пастернак М. Г. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – Випуск 45. – С. 472-478.
3. Innovative technologies and intelligent solutions. [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.magirusgroup.com/de/en>.
4. Марущак Я. Ю. Синтез систем автоматичного керування підйимального механізму для рятувальних робіт / Марущак Я. Ю., Кушнір А. П. // Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” науково-технічного журналу “Електроінформ” – Львів : ЕКОінформ, 2009. – С. 178-180.
5. Кушнір А. П. Вентильний електропривод механізму повороту платформи пожежного автопідйомника / Кушнір А. П., Марущак Я. Ю., Оксентюк В. М. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2014. – №24. – С. 103-110.
6. Оксентюк В. М. Комп'ютерне моделювання вентильного виконавчого двигуна для механізму повороту платформи пожежного автопідйомника / Кушнір А. П., Кравець І. П. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2015. – №26. – С.123-132.
7. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: навчальний посібник / Марущак Я. Ю. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2005. – 208 с.
8. Марущак Я. Ю. Керування горизонтальною складовою руху люльки підйимального механізму для рятувальних робіт / Марущак Я. Ю., Кушнір А. П. // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – № 28. – С. 309-311.

References:

1. *Autostairs are fire. General technical requirements and methods of test* (EN 14043:2005, IDT): DSTU EN 14043:2008/ Kyiv: Derzspozuvstandart of Ukraine 2004 (in Ukr.).
2. Diveiev, B., Koval T., and Pasternak M. (2011). “Application different of type pendulum dynamic gasnikov vibration”. *Avtomatizatsiya of virobnichih protsesiv in mashinobuduvanni that priladobuduvanni (Automation of productive processes in an engineer and instrument-making)*, 45, 472-478 (in Ukr.).

3. Innovative technologies and intelligent solutions. Retrieved from: <http://www.magirusgroup.com/de/en>.

4. Marushchak, Ya. Yu., and Kushnir, A. P. (2009). "Synthesis of lifting mechanism automatic control system for rescue works". *Problems of automatic electric drive. A theory and practice : Elektroinform*. Lviv : EKOinform 78-180 (in Ukr.).

5. Marushchak, Ya. Yu., Kushnir, A. P., and Oksentyuk V. M. (2014). "Switched electrical drive of platform's rotation mechanism of aerial appliance". *Fire of safety*. Lviv: LDU BGD, 24, 103-110 (in Ukr.).

6. Oksentyuk V. M., Kushnir, A. P., and Kravets I. P. (2015) "Computer simulation of executive switched motor for platform rotation mechanism of fire autolifts". *Fire of safety*. Lviv: LDU BGD, 26, 123-132 (in Ukr.).

7. Marushchak, Ya. Yu. (2005). *Synthesis of electromechanical systems with serial and parallel adjustment*. Lviv : National university "Lviv polytechnic" (in Ukr.).

8. Marushchak, Ya. Yu., Kushnir, A. P. (2010). Control of horizontal movement of lifting mechanism cradle for rescue works. *Problems of automatic electric drive. A theory and practice : Proceedings of the National technical university the "Kharkiv polytechnic institute"*, 28, 309-311 (in Ukr.).

