

УДК 621.83

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЕРОСТАТИЧНОГО СФЕРИЧНОГО ШАРНИРА

© С. В. Струтинський, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**Рассмотрена конструкция разработанного аэростатического сферического шарнира. Изложена методика экспериментальных исследований, описано специально разработанное оборудование и аппаратура. Приведены полученные результаты измерений силовых характеристик аэростатического сферического шарнира. Предложены аналитические зависимости для описания массивов экспериментальных данных. Установлены рациональные диапазоны изменения основных параметров аэростатического сферического шарнира.**

**The construction of the developed aerostatics spherical hinge is considered. The method of experimental researches is expounded, the specially developed equipment and apparatus is described. The got results of measurements of power descriptions of aerostatics spherical hinge are resulted. Analytical dependences are offered for description of arrays of experimental data. Rational turn-downs basic parameters of aerostatics spherical hinge are set.**

### **Постановка проблеми**

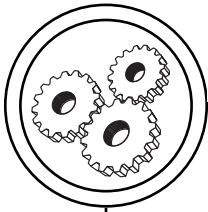
В точних просторових механізмах використовуються аеростатичні сферичні шарніри. На основі таких механізмів реалізовані вимірювальні машини, промислові роботи, маніпулятори, сенсори та інше прогресивне технологічне обладнання [1].

Основним вузлом просторового механізму є сферичний шарнір [2]. Прогресивним конструктивним рішенням є аеростатичний сферичний шарнір. Розробка і дослідження аеростатичних сферичних шарнірів просторових механізмів є актуальним.

Сферичні аеростатичні шарніри є складними технічними пристроями. Їх особливістю є

наявність значного числа вузлів із складними робочими процесами, пов'язаними із рухом стисненого повітря. Велика кількість факторів визначає закономірності роботи шарніра. Для дослідження характеристик аеростатичного шарніра застосовують теоретичні та експериментальні методи.

Реалізація аеростатичних сферичних шарнірів просторових механізмів є основою розв'язання важливих наукових та практичних завдань, пов'язаних з розробкою прогресивного технологічного обладнання. Застосування розроблених шарнірів дає можливість створити принципово нові системи маніпулювання об'єктами, зокрема в поліграфії.



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

### Аналіз попередніх досліджень

В останніх дослідженнях і публікаціях [2—4] наведено ряд конструкцій сферичних шарнірів, зокрема шарнірів аеростатичного типу. Розглянуто конструктивні особливості шарнірів та їх систем керування. Значну увагу приділено питанням розрахунку характеристик шарнірів та математичного моделювання шарнірів в процесі зміни різноманітних зовнішніх параметрів [5]. Ці дані є основою для комплексу досліджень властивостей аеростатичних сферичних шарнірів просторових механізмів.

В останніх публікаціях не виявлено даних по експериментальних дослідженнях аеростатичних сферичних шарнірів. Відсутні дані по методиці досліджень та обладнанні.

До не вирішеної раніше частини загальної проблеми створення надійних аеростатичних сферичних шарнірів відноситься експериментальне визначення характеристик шарнірів. Проведення експериментальних досліджень потребує розробки спеціального обладнання та методики досліджень.

### Мета роботи

Метою досліджень є експериментальне визначення силових характеристик аеростатичного сферичного шарніра. Основними завданнями досліджень поставлено розробка спеціальної установки та методики досліджень, експериментальні виміри характеристик та їх опис за допомогою запропонованих залежностей та визначення впливу основних параметрів на си-

лову характеристику аеростатичного сферичного шарніра.

### Результати проведених досліджень

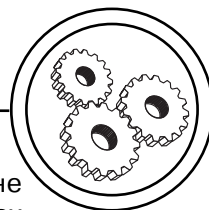
Розроблений аеростатичний сферичний шарнір [6] має сферу 1 (рис. 1).

В корпусі 2 і кришці 3 виконано ділянки внутрішніх сферичних поверхонь, що утворюють аеростатичні опори. Корпус і кришка шарніра мають пристрої для взаємного відносного переміщення та систему виміру положення сфери відносно корпусу шарніра. Шарнір має пневмосистему живлення аеростатичних опор із контрольно-регулюючою та вимірювальною апаратурою.

Для проведення експериментальних досліджень розроблена спеціальна методика та обладнання. При навантаженні сферичного шарніра використано безлюфтовий гвинтовий пристрій 4 в комплекті із двостороннім кільцевим динамометром 5. Переміщення сфери реєструється індикаторами з точністю  $\pm 0,5$  мкм. Навантаження сфери здійснюється в межах конуса з куту при вершині  $40^\circ$  при вертикальному розташування вісі конуса. Методика включає послідовне знакозмінне навантаження сфери радіальним навантаженням в межах  $\pm 1000$  Н ступенями по 50 Н. При цьому реєструється переміщення сфери відносно її номінального положення.

В процесі експериментальних досліджень визначені основні характеристики сферичного аеростатичного шарніра. Даний варіант шарніра має сім опорних елементів розміщених

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



по периферії сферичного шарніра (рис. 1, б, в). Всього сферичний шарнір має шість аеростатичних опор і один нерегульований розвантажувальний (1П) опорний вузол. Три опори 1В, 2В, 3В утворюють верхній несучий пояс сферичного шарніра, а три 1Н, 2Н і 3Н — нижній несучий пояс.

Для регулювання тиску в опорних вузлах служать дроселі

в пневмосистемі. Одночасне регулювання тиску у всіх опорах здійснюється дроселем DO. Регулювання тиску живлення в опорних вузлах верхнього пояса здійснюється дроселями D1В, D2В, D3В. Дроселі D1Н, D2Н, D3Н служать для регулювання тиску живлення аеростатичних опор нижнього пояса. Зміна тиску у нерегульованому опорному вузлі 1П здійснюється дросе-

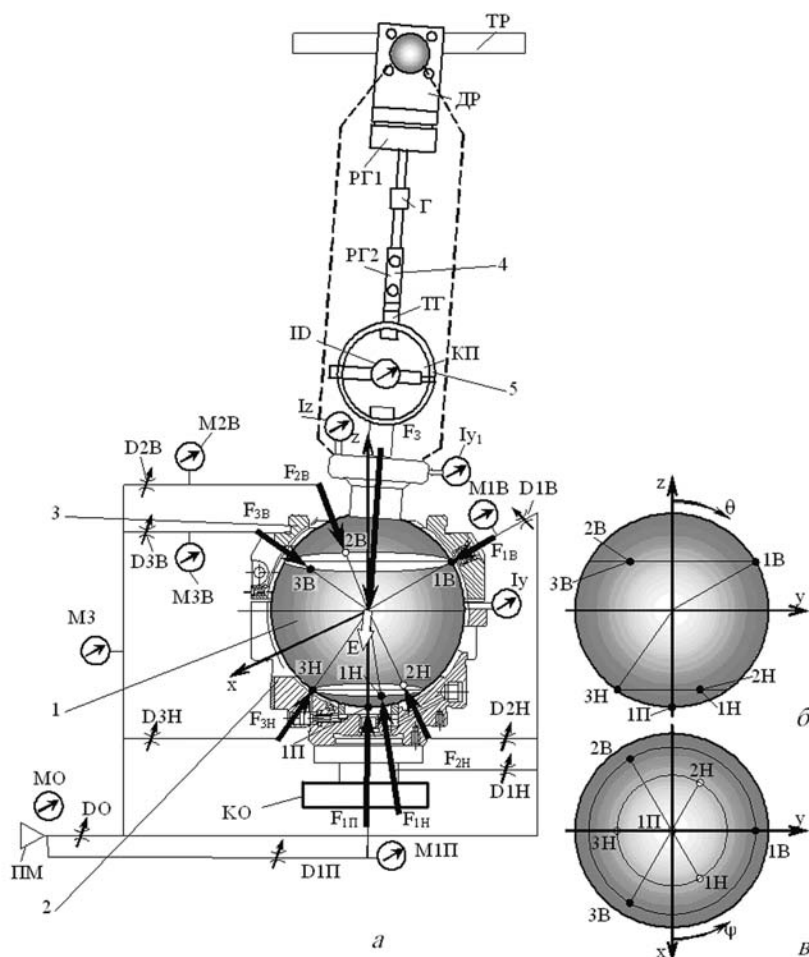
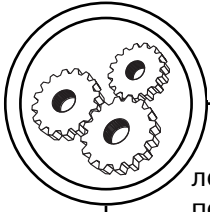


Рис. 1. Схема експериментальної установки із зазначенням розташування окремих опорних вузлів сферичного шарніра та опорних реакцій вузлів



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

лем D1П. Для вимірів тиску повітря на ділянках пневмосистеми служать манометри М1В, М2В, М3В, М1П, М3 та М0. Останній манометр М0 вимірює тиск в загальній пневмомагістралі ПМ.

Для навантаження сферичного шарніра використано силовий гвинтовий привод у комплекті із кільцевим динамометром двосторонньої дії. Привод включає гвинт Г із хвостовиками, що мають праву і ліву метричну різьбу. Хвостовики гвинта входять в розрізні гайки РГ1 та РГ2. Одна із розрізних гайок (РГ1) є частиною державки ДР,

яка закріплена на траверсі ТР. Друга розрізна гайка виконана в тязі ТГ, що з'єднана із кільцевою пружиною КП динамометра. Деформації кільцевої пружини вимірюються індикатором годинникового типу ІД. Перед установкою динамометра із навантажувальним пристроєм проведемо його тарування. Встановлено, що показання індикатора практично лінійно залежать від навантаження на динамометр.

Корпус сферичного шарніра закріплено на основі КО (див. рис. 1). Переміщення сфери у вертикальному напрямку вимірюється індикатором Із. При ро-

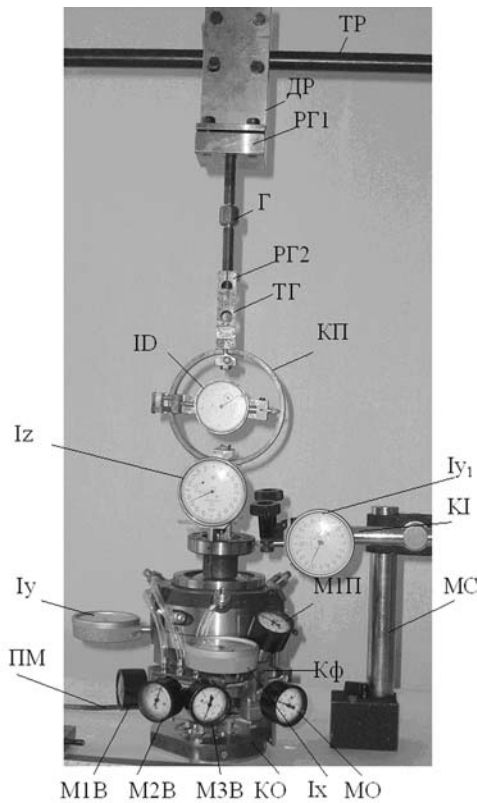
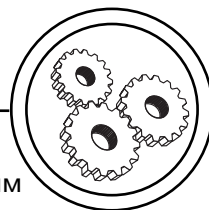


Рис. 2. Загальний вигляд установки для експериментальних досліджень силових характеристик аеростатичного сферичного шарніра

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



боті навантажувального пристрою можливі невеликі зміни кутового положення тяги а відповідно і рухомої сфери шарніра.

Для виключення впливу можливих змін кутового положення тяги на результати вимірів використовувалось два паралельно працюючих індикатора  $I_z$ , які встановлені симетрично відносно площини кільцевої пружини динамометра.

Переміщення центральної частини сфери відносно корпусу в напрямку вісі у вимірюється індикатором  $I_y$ . Переміщення верхньої частини рухомої сфери в горизонтальному напрямку вимірюється індикатором  $I_{y_1}$  (рис. 2).

Даний індикатор встановлено на кронштейні К1, що розташований на магнітній стійці МС. Переміщення сфери в напрямку вісі  $x$  вимірюється індикатором  $I_x$ .

Експериментальні виміри здійснено при навантаженні сфери статичним знакозмінним навантаженням в напрямку вісі штанги.

Попереднім регулюванням дроселів встановлено тиск живлення аеростатичних опор  $p_H = 0,15 \pm 0,01$  МПа при тиску в пневмомагістралі 0,4 МПа.

Навантажувальним пристроєм створювалось вертикальне навантаження на сферу вниз по ступеням. При цьому двома індикаторами  $I_{z_1}$  та  $I_{z_2}$  вимірювалось зміщення сфери у вертикальному напрямку. Зміщення сфери вниз від середнього положення є від'ємними.

Аналогічним чином здійснено вертикальне навантаження

сфери зусиллям направленим вгору. При цьому індикаторами вимірювалось додатне зміщення сфери у вертикальному напрямку.

По даним вимірів побудована залежність переміщення сфери від діючого на неї вертикального навантаження (рис. 3).

Для апроксимації експериментальних даних використана аналітична залежність у вигляді полінома третього порядку [7]:

$$F = -ae - be^3, \quad (1)$$

де коефіцієнти полінома  $a$  і  $b$  підібрані із умови найкращої відповідності теоретичних і експериментальних даних і складають:

$$\begin{aligned} a &= 5,5 \text{ Н} \cdot \text{мкм}^{-1}, \\ b &= 0,001 \text{ Н} \cdot \text{мкм}^3. \end{aligned} \quad (2)$$

Формула (1) є основою для визначення явної розрахункової залежності переміщення сфери  $e$  від діючого на неї навантажен-

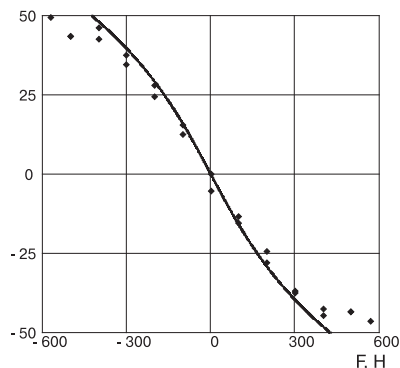
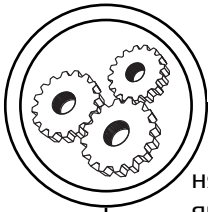


Рис. 3. Експериментально визначена залежність переміщення сфери від діючого навантаження (точки на графіку) та розрахункова крива, що відповідає поліному третього порядку, визначеному формулами (1, 3)



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

ня  $F$ . Явна залежність знайдена як розв'язок алгебраїчного рівняння (1).

Рівняння має один дійсний та два комплексно спряжених корені. Дійсний корінь для значень коефіцієнтів  $a$  і  $b$  відповідних (2) визначає силову характеристику сферичного шарніра у вигляді

$$e(F) = \left( \sqrt{2.5e5F^2 + 8.0e9 - 500F} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{2000}{\left( \sqrt{2.5e5F^2 + 8.0e9 - 500F} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

Дана залежність наведена у вигляді кривої на рис. 3.

Відхилення експериментальних даних від розрахункових залежностей (1), (3) не перевищує 4 мкм у всьому діапазоні зміни навантаження на сферу. Це складає близько 8 % від максимального переміщення сфери. При невеликих зусиллях, що діють на сферу ( $|F| \leq 200\text{Н}$ ) відносна розбіжність експериментальних і розрахункових пе-

реміщень сфери не перевищує 5 %. Із порівняння результатів розрахунків із експериментальними даними впливає деяка розбіжність якісного характеру розрахункової залежності та результатів експерименту при великих навантаженнях ( $|F| \geq 200$ ).

На підставі цього виконано уточнення розрахункової залежності (1). Уточнена залежність має вигляд полінома 5-го степеня.

$$F_e = -a_e e - b_e e^3 - c_e e^5, \quad (4)$$

де значення коефіцієнтів вибрані із умови відповідності залежності (4) експериментальним даним і складають:

$$a_e = 5,5 \text{ Н} \cdot \text{мкм}^{-1},$$

$$b_e = 0,0011 \text{ Н} \cdot \text{мкм}^{-3},$$

$$c_e = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{мкм}^{-5}.$$

Уточнена залежність (4) значно точніше відповідає експериментальним даним (рис. 4).

Із порівнянням уточненої залежності із експериментальни-

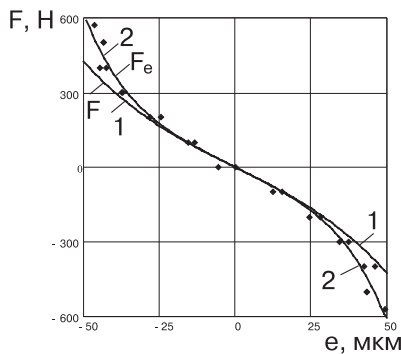


Рис. 4. Порівняння розрахункової по формулі (1) (крива 1) та уточненої згідної формули (4) (крива 2) залежностей із експериментальними даними (точки)

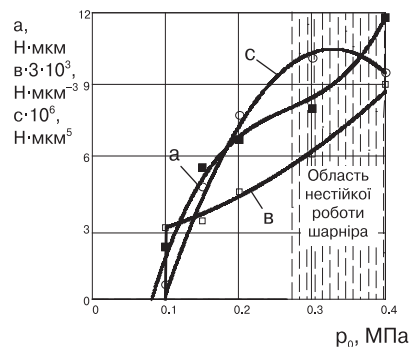
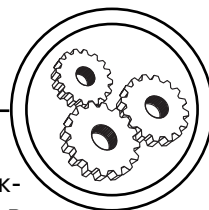


Рис. 5. Узагальнена залежність коефіцієнтів силової характеристики шарніра від тиску живлення

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



ми даними впливає, що максимальне відхилення значень розрахункового та експериментального зусиль при переміщенні сфери в діапазоні  $\pm 50$  мкм не перевищує 40 Н, що складає близько 7 % від максимального зусилля, що діє на сферу. Дане відхилення можна вважати незначним враховуючи складність сферичного аеростатичного шарніра та його системи керування.

Проведені експериментальні дослідження силових характеристик аеростатичного шарніра при дії на нього вертикальної сили дали можливість встановити вплив експлуатаційних параметрів зокрема тиску живлення на характеристики. При зміні тиску живлення змінюються параметри характеристик та виникають обмеження працездатності шарніра по причині виникнення вібрацій сфери. В процесі досліджень встановлено залежність коефіцієнтів поліноміальної залежності (4) характеристики від тиску живлення (рис. 5).

Згідно графіків, наведених на рисунку, коефіцієнти жорсткості аеростатичного шарніра (коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) монотонно зростають зі збільшенням тиску живлення. Стабільна робота аеростатичного сферичного шарніра має місце при тиску живлення, що не перевищує 0,25...0,28 МПа. При більш високому тиску живлення спостерігаються вібрації сфери та підвищений шум. Область нестійкої роботи шарніра показана на рисунку 5 вертикальною штриховкою. Тиск живлення 0,2...0,25 МПа можна вважати оптимальним з точки зору забезпечення стійкої роботи опори та достатньо високого коефіцієнту лінійної жорсткості

(коефіцієнт  $a$ ). При цьому характеристика близька до лінійної в діапазоні переміщень  $\pm 20$  мкм, тому що коефіцієнти  $b$  і  $c$  є достатньо малими.

За результатами експериментальних досліджень уточнені параметри сферичного шарніра і розроблений дослідний зразок. Конструктивне рішення захищено патентом України [8]. Розроблена технічна документація і виготовлено комплектний вузол сферичного шарніра призначений для використання в просторовому механізмі-гексаподі. Сферичний шарнір має сферу 1, виготовлену із карбіда бора (рис. 6).

Із сферою взаємодіють вставки 2, які мають охоплюючі сферичні поверхні із карманами опор рідинного тертя. Вставки закріплені на рухомій рамці 3, яка жорстко зв'язана із штангою 4. Наведені вище деталі об'єднані в рухомий блок, який поміщено в корпус шарніра 5. В корпусі наявні отвори 6, в які входять вставки, аналогічні вставкам 2, що служать для закріплення сфери 1.

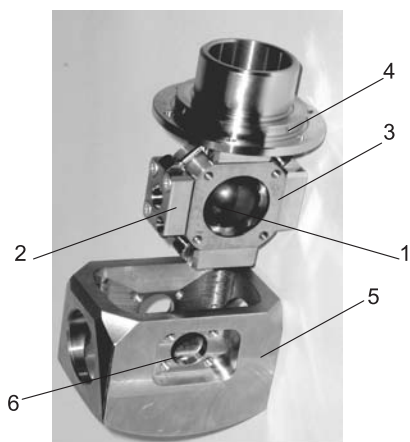
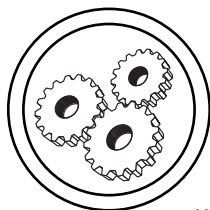


Рис. 6. Основні вузли і деталі виготовленого сферичного шарніра



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

Дослідний зразок апробовано у виробничих умовах, чим підтверджена його працездатність.

### Висновки

1. В результаті експериментальних досліджень підтверджена працездатність розробленого аеростатичного сферичного шарніра при тиску живлення 0,15...0,25 МПа.

2. При високому тиску живлення (більше 0,28...0,3 МПа) спостерігається нестабільність роботи шарніра, яка проявляється у виникненні вібрацій сфери та підвищеному шумі.

3. Силові характеристики аеростатичного сферичного шарніра мають лінійну ділянку в діапазоні навантажень  $\pm 200$  Н.

Експериментальні силові характеристики задовільно описуються поліномами третього або п'ятого ступеня.

4. Достовірність результатів експериментальних досліджень підтверджена розробкою на їх основі дослідного зразка сферичного шарніра. Виготовлено сферичний шарнір, який має точну сферу із карбіда бора та охоплюючі її опори рідинного тертя.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується проведення робіт по вдосконаленню конструкції аеростатичного сферичного шарніра з метою підвищення тиску живлення, а відповідно і несучої здатності шарніра.

1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, І. А. Валявський, Р. А. Складаров / Під ред. Ю. М. Кузнецова : Навч. посібник. — Кіровоград : Імекс Л.Т.Д., 2004. — 439 с. — Бібл. : 404-417. ISBN 966-7822-76-1. 2. Бушуев В. В. Практика конструювання машин : Справочник / В. В. Бушуев. — М. : Машиностроение, 2006. — 448 с. — Бібл. : 438-439. ISBN 5-217-X-03341-X. 3. Воскресенский В. А. Расчет и проектирование опор жидкостного трения / В. А. Воскресенский, В. И. Дьяков, А. З. Зиле. — М. : Машиностроение, 1983. — 232 с. 4. Войтов В. А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В. А. Войтов, О. М. Яхно, Ф. Х. Аби Сааб. — К. : Техніка, 1999. — 192 с. 5. Шиманович М. А. Безконтактные опоры с внешним источником давления смазочной среды / М. А. Шиманович // Станки и инструменты. — 1987. — № 6. — С. 16—18. 6. Струтинський С. В. Прецизійний поворотний вузол просторового механізму / С. В. Струтинський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. — Кіровоград : КНТУ, 2006. — Вип. 17. — С. 100—107. — Бібліогр.: С. 107. 7. Струтинський С. В. Визначення статичних і динамічних характеристик гідростатичного сферичного опорного вузла / С. В. Струтинський, О. М. Яхно // Промислова гідраліка і пневматика. — 2007. — № 2(16). — С. 85—90. — Бібліогр. : С. 90. ISSN 1994-4691. Фахове видання. 8. Патент України на корисну модель № 43729. Шарнір для просторового механізму / Струтинський С. В., МПК F16D3/16, u200903735, заявл. 16.04.2009, опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.

Рецензент — Ю. В. Петраков,  
д.т.н., професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 05.03.10