

ТДТУ. – 2004. – № 1. – С. 26–33. 9. Нагорняк С.Г., Луцив И.В. Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования: Справочник. – К.: Техніка, 1992. – 72 с. 10. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 368 с.

УДК 621.001.2:519168

Б.І. Кіндрацький, О.О. Шпак

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра деталей машин;
Львівський інститут Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
при Національному університеті “Львівська політехніка”,
кафедра автомобільної техніки

АЛГОРИТМ І ОПТИМІЗАЦІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ЗАПОБІЖНИХ МУФТ

© Кіндрацький Б.І., Шпак О.О., 2008

Розроблено алгоритм і оптимізаційну математичну модель багатокритеріального структурно-параметричного синтезу кулькових запобіжних муфт з профільним замиканням з урахуванням конструктивних та функціональних обмежень.

The optimization mathematical model of multiobjective structural – parametrical synthesis of ball-type overload release clutch with taking into account structural and functional limitations is developed.

Актуальність теми і огляд літератури. Надійність і довговічність роботи приводів машин і механізмів, що працюють в умовах частих перевантажень, значною мірою залежать від ефективності роботи систем захисту їх від руйнування. Насамперед це стосується розгалужених приводів машин, де система захисту, наприклад електрична, основного двигуна не забезпечує надійного захисту окремих кінематичних ланцюгів, що споживають невелику частку його потужності. У таких приводах встановлюють додаткові системи захисту від руйнування окремих кінематичних ланцюгів – запобіжні муфти (ЗМ). Від їхніх характеристик залежить довговічність і надійність роботи приводів.

До таких муфт ставлять певні вимоги, зокрема, забезпечення високої точності спрацювання у разі перевантажень, створення мінімального навантаження на ланки приводу після спрацювання, мінімальні габарити і маса, висока надійність та довговічність тощо.

В існуючій літературі [1, 2] під час проектування запобіжних муфт здійснюють переважно їх статичний силовий розрахунок на заданий граничний крутний момент. Аналогічний розрахунок передбачають і відповідні стандарти [3, 4]. Відомі праці [5–7], в яких отримані залежності для розрахунку запобіжних муфт у режимі спрацювання і зроблені рекомендації щодо зменшення їхньої динамічності під час пробуксовування. У праці [8] вперше було виконано багатокритеріальний структурно-параметричний синтез кулачкової запобіжної муфти, де віброактивність муфти після спрацювання оцінювали за коефіцієнтом динамічності, розрахованим на основі спрощеної динамічної моделі приводу. Однак синтез ЗМ за коефіцієнтом динамічності, отриманим без врахування динамічної характеристики двигуна і пружно-інерційних параметрів приводу, за певних умов може призвести до істотних динамічних навантажень на його ланки [9]. Важливим також критерієм під час проектування ЗМ є їхня складність і технологічна собівартість, бо муфти – це продукція масового виробництва і необгрунтоване ускладнення конструкції призводить до великих економічних втрат.

Отже, оскільки конструкції ЗМ є дуже різноманітні [10–15] і ефективність їхньої роботи характеризується багатьма, часто суперечливими, критеріями якості, то розроблення ефективного

алгоритму і методики синтезу таких муфт за заданими умовами роботи приводу є актуальним і має важливе практичне значення.

Мета статті – розробити алгоритм і методику багатокритеріального структурно-параметричного синтезу ЗМ за заданими умовами роботи приводу.

Постановка задачі. Нехай потрібно спроектувати запобіжну муфту для захисту ланок електро-механічного приводу від руйнування під час перевантаження, забезпечивши її високу точність спрацювання, довговічність, простоту конструкції і мінімальну собівартість виготовлення.

Алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу запобіжних муфт. Ґрунтуючись на концепції і методі багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій [16], пропонуємо такий алгоритм структурно-параметричного синтезу ЗМ (рис. 1).

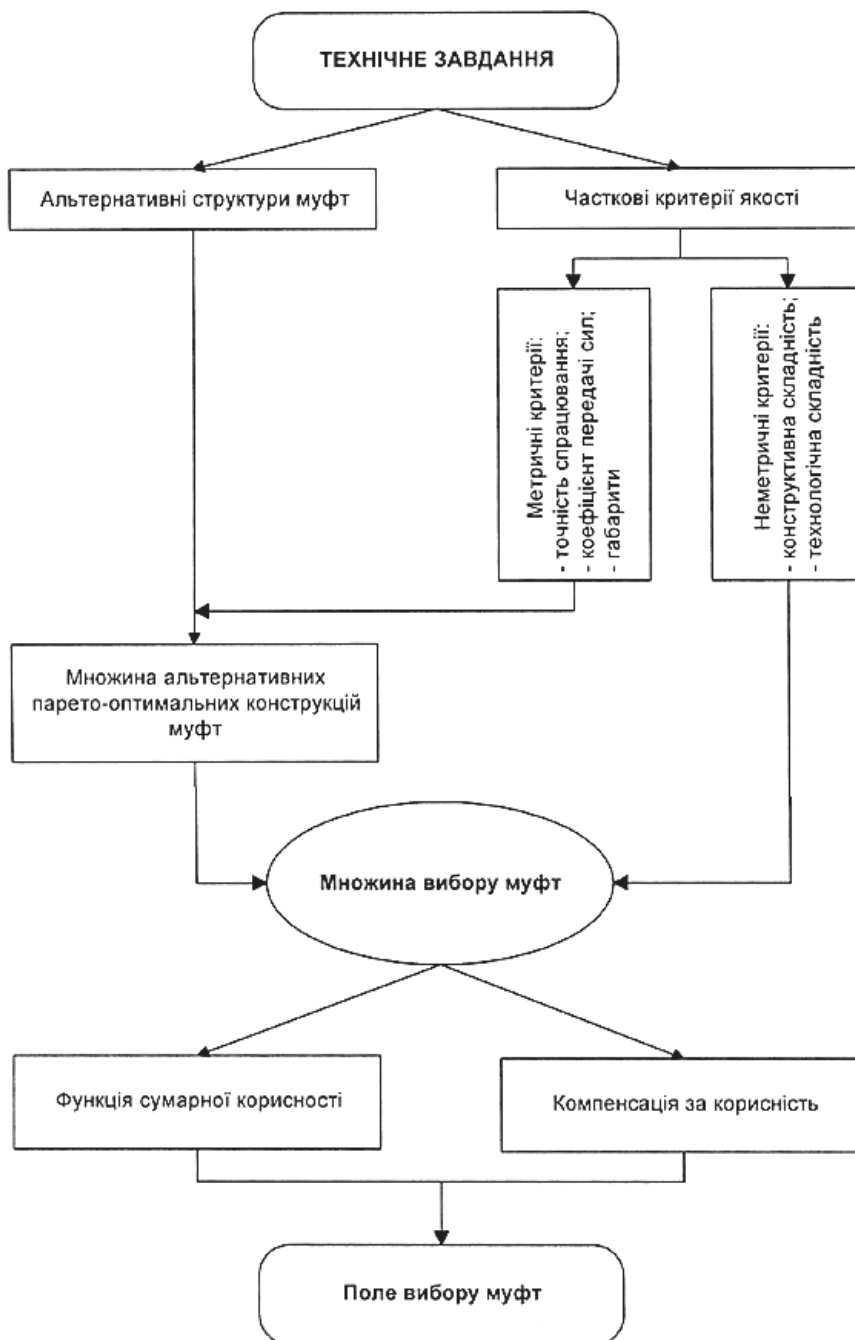


Рис. 1. Алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу запобіжних муфт

Розділимо критерії, які характеризують досконалість запобіжної муфти, на дві групи: перша – критерії, значення яких можна виразити функціональною залежністю від проектних параметрів ЗМ; друга – критерії, для яких записати функціональні залежності від проектних параметрів ЗМ не можливо, але вони істотно впливають на оцінку її якості.

Згенеруємо відомими методами, або виберемо з банку даних альтернативні структури ЗМ, виконаємо їхню векторну оптимізацію за критеріями першої групи і сформуємо множину альтернативних варіантів ЗМ різної структури.

Для вибору з цієї множини кращого з альтернативних варіантів ЗМ відобразимо їх у множину вибору, обчисливши додатково значення критеріїв якості другої групи. Оскільки альтернативні варіанти ЗМ можуть переважати один одного за певними критеріями і поступатися за іншими, то зведемо оцінку їхньої якості на завершальній стадії до двох інтегральних критеріїв: сумарної корисності (визначатиме технічну досконалість ЗМ) та компенсації за корисність (відобразатиме затрати, які треба зробити заради досягнення потрібної сумарної корисності).

Розрахувавши ці два інтегральні критерії якості ЗМ, побудуємо відповідно до рекомендацій [16] в декартовій системі координат “поле вибору”, відклавши по осі ординат значення сумарної корисності ЗМ, а по осі абсцис – значення компенсації за корисність для всіх альтернативних варіантів ЗМ з множини вибору. Найкращим (оптимальним) з альтернативних варіантів ЗМ вважатимемо той, в якого значення сумарної корисності більше від меншого значення компенсації за корисність. Визначивши на завершальній стадії кращий з альтернативних варіантів ЗМ, оберемо одночасно її раціональну структуру й оптимальні параметри.

Метричні критерії оцінки якості альтернативних варіантів запобіжних муфт. Враховуючи головні вимоги до експлуатаційних характеристик запобіжних муфт [1], оцінюватимемо їхню якість такими частковими критеріями:

– відхиленням моменту, який передає муфта, від заданого номінального значення

$$\Delta T = \left| \frac{T}{T_0} - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (1)$$

де T_0 – номінальний крутний момент; T – момент, який передає муфта за вибраних конструктивних параметрів;

– коефіцієнтом відносної точності спрацювання муфти

$$\beta_m = \frac{\gamma_m - 1}{\Delta f} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\gamma_m = T_{max}/T_{min}$ – коефіцієнт точності спрацювання муфти; Δf – приріст коефіцієнтів тертя в рухомих з’єднаннях муфти;

– коефіцієнтом перевищення номінального моменту під час спрацювання муфти

$$k_{cn} = \frac{T_{cn}}{T_0} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де T_{cn} – граничний момент, за якого спрацьовує муфта;

– максимальним коефіцієнтом динамічності ЗМ

$$k_{\delta}^{max} = \frac{T_{max}}{T_0}, \quad (4)$$

де T_{max} – максимальний пружний момент у валопроводах під час пробуксовування ЗМ.

– об’ємом умовного циліндра, описаного навколо муфти, параметри якого визначаються максимальними габаритними розмірами муфти

$$V = \pi R_g^2 L_m \rightarrow \min, \quad (5)$$

де R_g – максимальний радіальний розмір муфти; L_m – максимальний осьовий розмір муфти.

Параметри, що входять у формули (1)–(3), (5), залежать від структури і конструктивних параметрів муфти, їх можна розрахувати за залежностями для статичного силового розрахунку

відповідних муфт. Коефіцієнт динамічності під час спрацювання ЗМ визначатимемо за результатами моделювання динаміки приводу у перехідних режимах роботи (пуск, накидання корисного навантаження, стопорний).

Прогнозування складності запобіжних муфт. Прогнозування складності виробу на ранніх стадіях його проектування, зокрема схемного, є складною задачею, оскільки невідомими є його конструктивні параметри, масові характеристики, обсяг та технологічний процес виготовлення.

Якісну оцінку складності виробу (ЗМ зокрема) на ранніх стадіях проектування можна здійснити за критеріями, що характеризують його конструктивну і технологічну складність (рис. 2). Однак розрахувати ці критерії на ранніх стадіях проектування відомими методами, а, отже, використати під час оптимізаційного синтезу виробу не можливо.

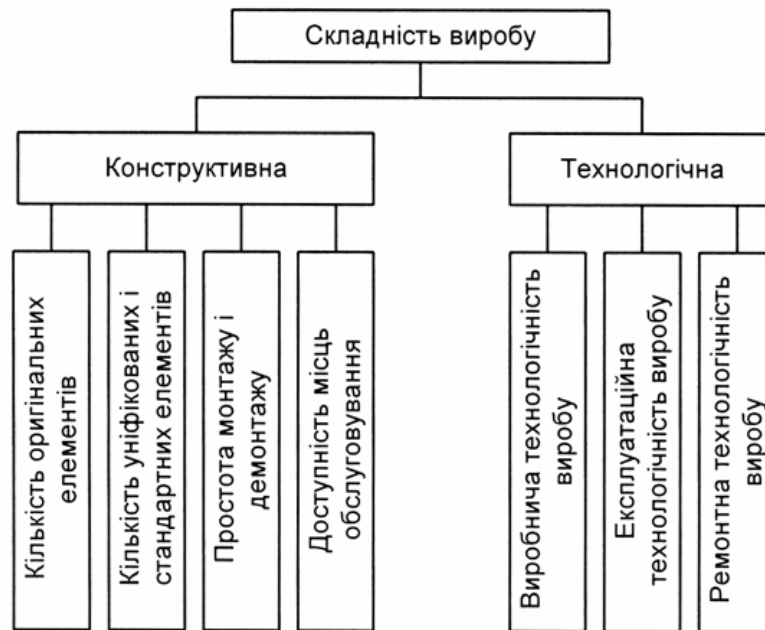


Рис. 2. Техніко-економічні показники складності виробу

Для кількісної оцінки складності виробу і врахування цього критерію у разі багатокритеріального синтезу запобіжних муфт пропонуємо такі критерії та алгоритм оцінювання складності виробу на ранніх стадіях проектування.

Складність виробу оцінюватимемо за зведеним коефіцієнтом складності виробу

$$KCK = KTC \times KKC, \quad (6)$$

де KTC – коефіцієнт технологічної складності виробу; KKC – коефіцієнт конструктивної складності виробу.

Значення коефіцієнтів KTC і KKC визначатимемо за формулами

$$KTC = \frac{\prod_{i=1}^n k_i h_i}{\prod_{i=1}^m k_i h_i}; \quad (7)$$

$$KKC = k_n k_y k_{об} k_m, \quad (8)$$

де n – кількість видів технологічних операцій, потрібних для виготовлення альтернативного виробу; m – кількість технологічних операцій, потрібна для виготовлення базового виробу; k_i , h_i – коефіцієнт складності i -ї технологічної операції та її повторюваність; k_n , k_y , $k_{об}$, k_m – коефіцієнти новизни, уніфікації, складності обслуговування та монтажу виробу.

При цьому

$$k_n = Q_{OA} / Q_{OB}, \quad (9)$$

$$k_y = Q_{CA} / Q_{CB}, \quad (10)$$

де Q_{OA} , Q_{CA} – кількість оригінальних та стандартних елементів в альтернативному виробі; Q_{OB} , Q_{CB} – кількість оригінальних та стандартних елементів у базовому виробі.

Інші показники складності виробу, які не можливо оцінити кількісно на ранній стадії проектування виробу, враховуватимемо методом експертних оцінок.

Формування множини альтернативних парето-оптимальних варіантів запобіжних муфт. Щоб сформувати множину альтернативних парето-оптимальних у межах своєї моделі варіантів ЗМ різної структури, послідовно розв'яжемо для кожної з альтернативних структур таку задачу векторної оптимізації:

$$f_i(x) \rightarrow \min_x; x \in D \quad (i = \overline{1, k});$$

$$D = \left\{ x \in R^n \mid g_i(x) \leq 0; g_i(x) = 0 \quad (i = \overline{1, m}); \right. \\ \left. \left(i = \overline{m+1, s}; a_j \leq x_j \leq b_j \quad (j = \overline{1, q}) \right) \right\}. \quad (11)$$

де x – вектор проектних параметрів ($x \in R^n$); D – множина допустимих розв'язків; $f(x)$ – скалярна функція мети векторного аргументу; $g(x)$ – скалярні функції векторного аргументу.

Розв'язавши оптимізаційну задачу (11) для кожної з альтернативних структур запобіжних муфт, вибираємо з області допустимих розв'язків ефективні і включаємо їх до множини альтернативних парето-оптимальних варіантів ЗМ (див. рис. 1).

Розрахунок функції сумарної корисності альтернативних варіантів запобіжних муфт. Означимо критерії якості запобіжних муфт, які характеризують її роботу, як множину, що містить не менше двох елементів, що відповідають різним рівням вимірної величини.

Вважатимемо, що кожен з варіантів муфти S_1, S_2, \dots, S_m характеризується критеріями x_1, x_2, \dots, x_n , де $n \geq 2$, а область визначення кожного з них – задана. Тоді числове значення функції сумарної корисності ЗМ, яка характеризується n критеріями і k режимами функціонування на множині X визначимо за формулою [17]

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n v_i w_i(x_i), \quad (12)$$

де v_i – додатна константа; w_i – числова функція корисності i -го критерію.

Встановимо для всіх критеріїв однакову шкалу вимірювання корисності $a \leq w_i(x_i) \leq b$, тоді коефіцієнти v_i будуть масштабовальними множниками (ваговими коефіцієнтами). У такому разі задачу вибору кращого варіанта запобіжної муфти сформулюємо так: існує m варіантів муфт S_j ($j=1, 2, \dots, m$), які характеризуються n частковими критеріями якості X_i ($i=1, 2, \dots, n$) і k режимами функціонування f_q ($q=1, 2, \dots, k$). Потрібно оцінити корисність кожного з альтернативних варіантів S_j і обрати такий S^* , що характеризується найбільшим значенням функції сумарної корисності.

Кожній муфті S_j , яка функціонує у q -му режимі, поставимо у відповідність n -мірний вектор

$$x_{qi}^j = (x_{q1}^j, x_{q2}^j, \dots, x_{qn}^j), \quad (13)$$

де x_{qi}^j – значення i -го критерію для j -го варіанта конструкції під час функціонування в q -му режимі.

Враховуючи усі режими функціонування, для кожного варіанта ЗМ S_j складемо $k \times n$ -матрицю значень критеріїв $A_j = \|x_{qi}^j\|$ ($j=1, 2, \dots, m$; $q=1, 2, \dots, k$; $i=1, 2, \dots, n$). Матрицю A_j розглянемо як

сукупність багатовимірних альтернативних варіантів. Позначаючи величину функції сумарної корисності j -го альтернативного варіанта S_j через $u(S_j)$ і спираючись на основні положення теорії сумарної корисності [18], запишемо

$$u(S_j) = \sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^n r_q w_{qi}^j v_i, \quad (14)$$

де r_q – ваговий коефіцієнт q -го режиму роботи конструкції ($q=1,2, \dots, k$); w_{qi}^j – значення функції корисності, що відповідає значенню ($j=1,2, \dots, m$; $q=1,2, \dots, k$; $i=1,2, \dots, n$); v_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію ($i=1,2, \dots, n$).

Розрахунок функції сумарної корисності для кожного з альтернативних варіантів запобіжної муфти здійснюватимемо відповідно до методу, наведеному в [16].

Прогнозування ціни споживання запобіжних муфт. Орієнтовно технологічну собівартість альтернативних варіантів ЗМ визначатимемо за методом питомої ваги затрат на куповані елементи в собівартості конструктивно й технологічно подібних виробів [19]:

$$S_{Bi} = \frac{B_{ki} \times 100}{K_{ki}} k_{Bi}, \quad (15)$$

де S_{Bi} – очікувана собівартість i -го варіанта муфти; B_{ki} – сума затрат на куповані елементи i -го варіанта муфти; K_{ki} – питома вага затрат на куповані елементи в собівартості аналогічного виробу, %; k_{Bi} – коефіцієнт, що враховує конструктивні й технологічні особливості нового виробу порівняно з існуючим.

Вибір кращого з альтернативних варіантів запобіжних муфт за критерієм сумарної корисності та компенсацією за корисність. Обчисливши для кожного з альтернативних варіантів ЗМ значення функції сумарної корисності $u(S_j)$ за формулами (14) і значення компенсації за корисність (собівартість виготовлення муфт) відповідно до рекомендацій, наведених у [16], будуватимемо “поле вибору”, якісний вигляд якого зображений на рис. 3. За умов обмеження на собівартість виготовлення муфти (C_{max}) найкращою (оптимальною) вважатимемо муфту, яка має найбільше з наведених альтернативних варіантів значення функції сумарної корисності при собівартості виготовлення, меншій від допустимої, тобто у ситуації, показаній на рис. 3, – муфту з номером K_3 .

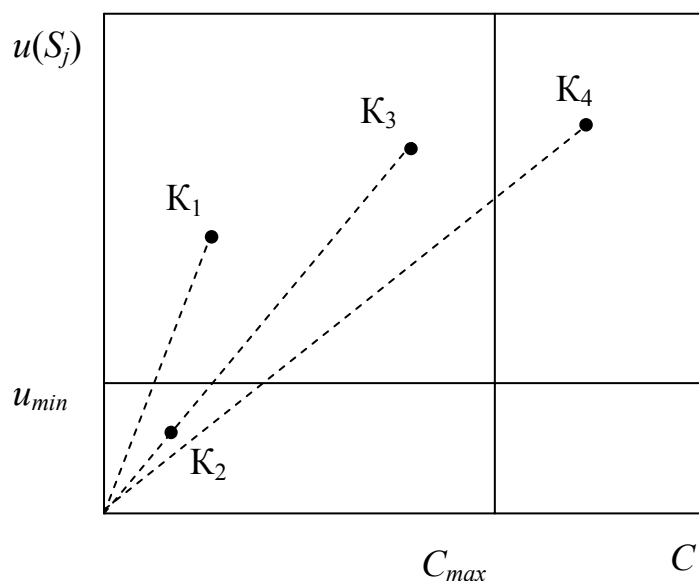


Рис. 3. Поле вибору запобіжних муфт

За умови, що потрібно спроектувати найефективнішу ЗМ, забезпечивши при цьому мінімальну собівартість її виготовлення, оптимальною з зображених на рис. 3 альтернативних варіантів буде муфта за номером K_1 , яка має найбільше значення питомої ефективності.

Висновки. 1. Запропоновано методологічний підхід і розроблено загальний алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу запобіжних муфт за заданими режимами роботи приводу.

2. У розвиток БАКСПАС-методу [16] розроблено методологічний підхід і алгоритм прогнозування складності виробу, зокрема ЗМ, на ранніх стадіях проектування. Запропоновані критерії оцінки і залежності для розрахунку коефіцієнтів технологічної та конструктивної складності виробу, інтегрального коефіцієнта складності виробу.

3. Розроблена математична модель і запропонована методика виконання багатокритеріального структурно-параметричного синтезу ЗМ на стадії схемного проектування виробу.

1. Поляков В.С., Барбаши И.Д., Ряховский О.А. *Справочник по муфтам* / Под ред. В.С. Полякова. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344 с. 2. Малащенко В.О. *Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків: Навч. посібник.* – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2006. – 196 с. 3. ДСТУ 2130-93. *Муфти запобіжні кулачкові. Параметри та розміри.* – На заміну ГОСТ 15620-81. 4. ГОСТ 15621-77. *Муфты предохранительные шариковые.* – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 6 с. 5. Гладько Ю., Буряк М. *Особливості розрахунку низькодинамічної кульково-кулачкової запобіжної муфти* // Вісн. ТДТУ. – 2002. – № 2. – С. 55–60. 6. Гевко Р., Стухляк П., Буряк М. *Силовий розрахунок кулькової запобіжної муфти з радіальними елементами зачеплення* // Вісн. ТДТУ. – 2004. – № 1. – С. 26–33. 7. Кіндрацький Б.І. *Синтез механічних систем за критерієм сумарної корисності* // Тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. “Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования” – “ГЕРВИКОН-99”. – Т. 1. – Сумы: СумГУ, 1999. – С. 73–79. 8. Кіндрацький Б.І. *Структурно-параметричний синтез кулачкової запобіжної муфти* // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 509. – С. 76–85. 9. Кіндрацький Б.І. *Експериментальне дослідження динаміки приводу із запобіжною муфтою з профільним замиканням у стопорному режимі роботи* // Вісн. УкрЛДТУ. – Львів: УкрЛДТУ, 2002. – Вип. 12.8. – С. 169–174. 10. А. с. 868170 СССР, МКИ F 16D 7/06. *Шариковая предохранительная муфта* / Б.И. Киндрацкий. – № 2829435/25-27; Заявлено 22.10.79; Опубл. 30.09.81, Бюл. № 36. – 4 с. 11. А. с. 1051342 СССР, МКИ F 16D 7/06. *Шариковая предохранительная муфта* / Б.И. Киндрацкий. – № 3467185/25-27; Заявл. 07.07.82; Опубл. 30.10.83, Бюл. № 40. – 7 с. 12. А. с. 1278517 СССР, МКИ F 16 D 7/06. *Шариковая предохранительная муфта* / Б.И. Киндрацкий, М.С. Комаров, А.И. Коржан. – № 3628231/25-27; Заявл. 13.05.83; Опубл. 23.12.86, Бюл. № 47. – 3 с. 13. А. с. 1298442 СССР, МКИ F 16D 9/00. *Предохранительная муфта* / Б.И. Киндрацкий, А.И. Коржан. – № 3930691/31-27; Заявл. 19.07.85; Опубл. 23.03.87, Бюл. № 11. – 4 с. 14. А. с. 1599597 СССР, МКИ F 16 D 15/00. *Выключаемая муфта* / Р.С. Курендаш, Б.И. Киндрацкий. – № 4390330/31-27; Заявл. 13.03.88; Опубл. 15.10.90, Бюл. №38. – 3 с. 15. Пат. Україна 24775. *Кульцова запобіжна муфта* / Б.І. Кіндрацький, А.О. Бурковський, О.О. Шпак. Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10. 16. Кіндрацький Б.І. *Концепція і алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій* // Вісн. ТДТУ імені Івана Пулюя. – Тернопіль: ТДТУ, 2003. – Т. 8, № 1. – С. 73–82. 17. Кіндрацький Б.І., Сулим Г.Т. *Раціональне проектування машинобудівних конструкцій: Монографія.* – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2003. – 280 с. 18. Fishburn P.C. *Methods of Estimating Additive Utilities* // *Manag. Sci.* – 1967. – Vol. 13, No 7. – P. 435–453. 19. Житная И.П., Житный Е.П. *Технико-экономический анализ при проектировании и производстве машин: Учеб. пособие.* – К.: Вища шк., 1990. – 229 с.