

Таблиця 3

Параметри	Урал – 2Н, $m_n=5$ мм		Ю Т 3 – 65, $m_n=5$ мм					Д 3 П -0,25М, $m_n=5$ мм	
	$a_w=150$ мм, $u=1,62$		$a_w=150$ мм, $u=1$			$a_w=150$ мм, $u=2$		$a_w=150$ мм, $u=1$	
	Номер пари		Номер пари			Номер пари		Номер пари	
	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9
z_1	21	21	27	25	23	19	16	27	25
z_2	34	34	27	25	23	38	32	27	25
β	23°30′	23°30′	25°50′	33°30′	39°57′	18°12′	36°52′	25°50′	33°30′
p_x (мм)	39,377	39,377	36,266	28,448	24,451	50,272	26,171	36,266	28,448
q_{2l} (мм)	27,2	27,2	50,06	37,5	29,3	73,9	35,2	16,3	12,1
b (мм)	80	120	120	60	52	120	120	80	120
b_1 (мм)	80	120	38	60	52	50	38	80	38
c (мм)	0,00	0,00	44	0,00	0,00	20	44	0,00	44
I_1 (кг·см·с ²)	0,141	0,21	0,534	0,316	0,274	0,114	0,11	0,38	0,45
I_2 (кг·см·с ²)	0,87	1,31	0,534	0,316	0,274	1,63	1,6	0,38	0,45

Список літератури: 1. *Кириченко А.Ф., Федченко А.В.* Стенди для експериментального дослідження податливості зубів циліндричних зубчатих колес // Вестник НТУ «ХПІ».- Харків: 2004, №30, с.134-143. 2. *Кириченко А.Ф., Павлов А.И.* Проектирование и расчет геометрии зубчатых передач с эволютным зацеплением // Вестник НТУ «ХПІ».- Харків: 2004, №30, с.153-157.

УДК 621.831

П.Н. КАЛИНИН, к.т.н, Академія внутрішніх військ МВС України (Харків, Україна)
Л.В. КУРМАЗ, к.т.н, Політехніка Свентокшистська в Кельцах (Польща)
Ю.В. ЖЕРЕЖОН-ЗАЙЧЕНКО, НТУ „ХПІ” (Харків, Україна)

ОПТИМАЛЬНО-РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗУБЧАСТОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДА

У статті представлена методологія раціонального проектування електромеханічного приводу із зубчастими передачами. Задача раціонального проектування розглянута у формі параметричної оптимізації за 20 критеріями якості. Обґрунтовано використання методу допустимих множин,

що дозволяє керувати процесом вибору оптимально-раціонального рішення. Наведено приклад застосування запропонованого методу.

In work the methodology of rational designing of an electromechanical drive with tooth gearings is submitted. The problem of rational designing is considered in the form of parametrical optimization by 20 criteria of quality. Use of a method of allowable sets which allows to supervise over process of a choice of the optimum - rational decision is proved. The example of use of the offered method is considered.

Постановка проблеми. Актуальною проблемою розвитку машинобудування є створення конкурентоспроможних конструкцій машин, істотне поліпшення їх якості і технічного рівня. В роботі ця проблема розглядається на прикладі проектування електромеханічного приводу з передачами зачеплення, що складають ядро сучасних конструкцій приводів машин різного призначення.

Безумовно задачу підвищення технічного рівня приводів слід вирішувати на етапі проектування, де необхідно і можливо всебічно розглянути конструкцію і врахувати велику кількість суперечливих вимог.

Таким чином, питання оцінювання технічної досконалості приводів, формалізації технологій проектування, управління якістю проектування, і, як результат, якістю спроектованого об'єкту, безумовно є актуальними.

Аналіз літературних джерел. В науково-технічних роботах, що присвячені проблемам оптимізації, оптимального проектування розглядається широке коло задач /1-4/, зокрема технічного вдосконалення окремих елементів зубчастих приводів та приводів у цілому/5-7/, але загальної методології оптимального проектування технічних об'єктів не створено.

Складність і комплексність проблем, що вимагають рішення в процесі проектування і створення машин якісно нового рівня припускає використання найважливіших досягнень фундаментальних наук, конструювання і технології, захист обслуговуючого персоналу від вібрації й шуму, облік сучасних економічних, соціальних і екологічних проблем, а це зводить задачу оптимального проектування технічного об'єкту до задачі багатокритеріальної нелінійної оптимізації.

Ускладнення задач технічного проектування полягає у тому, що вони багатокритеріальні із суперечливими цільовими функціями, тому конструктору важко вибрати обґрунтоване компромісне рішення: класичні методи пошуку екстремумів і більшість нових пошукових методів оптимізації призначені лише для рішення однокритеріальних задач. Для успішного рішення багатокритеріальної задачі проектування необхідно обґрунтоване визначення припустимої безлічі рішень (областей зміни вектора параметрів проектованої системи).

Відсутність загальних методів оптимального проектування технічних об'єктів спонукає їх пошуку та розробці часткових методів.

Мета роботи. Свідома постановка будь-якої інженерної задачі оптимального проектування (задачі оптимізації) приводить до вирішення ряду проблем, серед яких можна виділити зокрема такі:

ПЕРША проблема – це формальне представлення об'єкта оптимізації, тобто проблема визначення і побудови математичної моделі оптимізації. Безумовно моделі проектування технічних об'єктів виявляються дуже складними.

ДРУГА – це формулювання і формування критерію оптимальності $\Phi(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n)$ даного об'єкта оптимізації. Рішення цієї задачі сполучено с великими труднощами, оскільки часто інженер добре знає, чого він хоче, але сформулювати своє бажання не може.

Привод безумовно слід віднести до технічних систем і визначити, що оцінка його технічного рівня не є композицією оцінок окремих службових властивостей, а потребує системного відображення.

ТРЕТЯ проблема – це проблема вибору методу рішення задачі оптимізації. Аналітичні методи тільки на перший погляд здаються більш привабливими, чим інші, тому що вони приводять до явного формального, у аналітичному виді рішення задачі. Це дається дорогою ціною різкого обмеження можливостей методів. Безумовно, для проектування технічних об'єктів аналітичні методи не придатні. Алгоритмічні (комп'ютерні) методи звичайно не зв'язані з необхідністю опису умов задачі оптимізації в аналітичному виді. Алгоритмічні методи вказують алгоритм (послідовність дій), здійснення яких приводить до деякого конкретного рішення, а коло задач, для яких можна вказати алгоритм рішення, надзвичайно широке, і, безумовно, охоплює і проектні задачі.

Внаслідок того, що технічні системи відносять до класу грубих систем, з урахуванням особливостей їх проектування градієнтні методи оптимізації для оптимального проектування використовувати не доцільно і треба віддавати перевагу прямим методам.

Забезпечення ефективності оптимального проектування приводить, як технічних об'єктів, пов'язано з проблемою багатокритеріального оцінювання проектних рішень, що суттєво ускладнюється численною множиною зв'язків між параметрами стану об'єкту проектування і різноманітними ознаками його якості, обмеженою і недостатньою інформативністю одиничних показників якості, а також суб'єктивністю результатів їхнього згортання в інтегральний критерій на основі експертно устанавлюваного вектора пріоритетів.

У зв'язку із означеним у роботі, на прикладі електромеханічного приводу із зубчастими передачами (рис. 1), розглянуті основні проблеми оптимального проектування технічного об'єкту і запропонована методологія використання прямого методу допустимих множин для пошуку оптимально-раціонального проектного варіанту приводу.

- 1–Електродвигун
- 2–муфта
- 3–конічний редуктор
- 4–циліндрична передача
- 5–зірочкабрама
- 6–рама

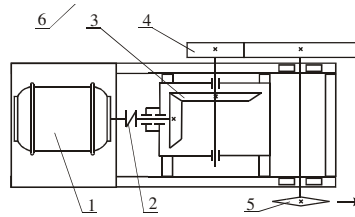


Рис. 1 – Схема приводу

Побудова математичної моделі об'єкту проектування. Вибір параметрів та критеріїв оптимізації. Задача оптимального проектування безумовно потребує створення математичної моделі технічного об'єкта, що проектується. Слова «математична модель» означає, що мають місце деякі формули чи програми, що дозволяють по заданому набору параметрів моделі $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ обчислювати будь-які характеристики $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_n$, що нас цікавлять.

Якщо проектування технічного об'єкта описується за допомогою визначених рекомендацій, з використанням табличних чи стандартних величин, мають описовий чи рекомендаційний характер, то математична модель повинна також включати ці положення. У такому разі математична модель вже за змістом ближче до проектно-математичної моделі (ПММ).

Звичайно задача проектування електромеханічного приводу [1] може бути представлена у вигляді

$$\Phi = P(\alpha_0), \quad (1)$$

де Φ – вектор критеріїв якості; α_0 – вектор параметрів; P – оператор (процес) проектування.

Залежність (1) слід розглядати як ПММ приводу. Проведення оптимізаційних дій, а це велика кількість конкурентно-спроможних варіантів, безумовно потребує щоб таку ПММ запрограмувати, тобто перекласти на мову обчислювальної техніки. Не викликає сумніву, що комп'ютерна форма ПММ приводу повинна враховувати сучасні рекомендації з проектування такого класу систем, інформаційну базу довідкового матеріалу, включаючи ДСТУ, ГОСТ, бо це закладає якість процесу проектування.

ПММ приводу (1) представлена у виді комп'ютерної програми, що складена з використанням елементів пакету *DM* навчально-дистанційного комплексу „Деталі машин”. Модульний принцип побудови ПММ приводу дозволяє, при необхідності, змінювати і варіюванні параметри і критерії якості, уточнювати методики проектування окремих елементів, без зміни моделей, що описують функціонування інших елементів, переходити на інші конструктивні схеми приводів і т.д. Відзначимо, що модульний принцип побудови комп'ютерної програми відповідає також і самій ідеології проектування, що носить модульний характер.

Процес проектування P електромеханічного приводу за схемою, що наведена на рис. 1, у загальному виді зводиться та таких етапів: 1- вибір двигуна та головних параметрів приводу; 2- розрахунок зубчастих передач (конічної закритої та циліндричної відкритої); 3-ескізне проектування зубчастого редуктора із побудовою розрахункових схем валів, підшипників, сполучень „вал-маточина”, системи мащення тощо; 4- перевірні розрахунки елементів приводу за головними критеріями працездатності; 5- технічне проектування приводу; 6- визначення критеріїв якості приводу.

До вибору параметрів оптимізації слід підходити дуже ретельно. Вектор параметрів моделі проектування α_0 , як правило, великий. Проте для ефективного рішення оптимізаційних задач проектування треба визначити вектор суттєвих параметрів α . Невдалий вибір варійованих параметрів моделі або вибір несуттєвих параметрів може значно погіршити процес знаходження оптимального рішення або зовсім зіпсувати процес оптимізації. Використання методичних рекомендацій, що до вибору суттєвих параметрів вузлів приводу, досвід проектування приводів, а також проведені чисельне дослідження з використанням пакету програм “DM” дозволило скласти вектор варійованих параметрів із 9 елементів:

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_9) = (n_{эл}, u_{ред}, HB_{к}, \psi_{к}, \beta_{к}, HB_{ц}, \psi_{bd}, \sigma_{ср}^{сгал}, ТП) \quad (2).$$

Тут α_1 - передаточне число конічного редуктора; α_2, α_5 – характеристики матеріалів, з яких виготовляють конічні та циліндричні колеса зубчастих передач; α_3, α_6 – коефіцієнти відносної ширини конічних та циліндричних зубчастих колів; α_4 – кут нахилу зубців конічної передачі; α_7 – характеристика матеріалу валів конічного редуктора; α_8 – тип підшипників, що використані у конічному редукторі на веденому валі; α_9 – частота обертання вала приводного двигуна.

Границі чисельних значень вибраних варійованих параметрів α наведені у таблиці 1.

Границі варійованих параметрів приводу

Таблиця 1

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
1...6*	200...300	0,2...0,3	0...35	170...228	0,4...0,6	600...1000	0000 36000 7000	1500 1000 750

Для більш повної та об’єктивної оцінки приводу і ілюстрації можливостей методу оптимізації були сформульовані 20 локальних критеріїв якості Φ_v : 1) $L_{ред}$ – довжина редуктора; 2) $H_{ред}$ – висота редуктора; 3) $B_{ред}$ – ширина редуктора; 4) m_{np} – маса приводу; 5) L_{np} – довжина приводу; 6) B_{np} – ширина приводу; 7) H_{np} – висота приводу; 8) S_{np} – площа, що займає привід;

9) $\theta = d_{a2}^u / (1,2 \cdot H_{ред})$ – параметр домірності циліндричної передачі та висоти редуктора; 10) $\gamma = m_{ред} / T_{ред}$ – технічний рівень редуктора: відношення маси редуктора до крутячого моменту на вихідному валі редуктора; 11) d_{a2}^u – діаметр виступів веденого циліндричного колеса відкритої зубчастої передачі; 12) a_w^u – міжосьова відстань циліндричної передачі; 13) m^u – маса зубчастих коліс відкритої зубчастої передачі; 14) $\xi(a_{w\min}^u / a_w)$ – параметр конструювання приводу, який пов'язаний з поліпшення конструкції приводу за рахунок встановлення опорних вузлів веденого валу відкритої зубчастої передачі на одній рамі з редуктором, тобто з бажанням опорні вузли відкритої передачі розташувати у межах ширини конічного редуктора; 15) χ – параметр, що характеризує жорсткість ведучого валу конічного редуктора: $\chi = d_{m1} / (1,35 \cdot d_{bk1})$ (Тут позначено: d_{m1} – середній діаметр конічної шестерні d_{bk1} – діаметр валу вихідного кінця ведучого валу редуктора); 16) S_v – характеристика міцності валів редуктора від утомленості. У якості S_v вибирається мінімальне значення відносного запасу міцності від втомленості для всіх небезпечних перетинів ведучого і веденого валів редуктора: $S_v = \min(S_i / [S])$, $i = 1, 2$ – номер вала редуктора; 17) $\varepsilon = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$ – коефіцієнт перекриття зубчастої передачі; 18) $P_{н\omega}$ – параметр безвідмовної роботи підшипників валів редуктора; 19) $\mu_{\sigma_K} = (\sigma_H / \sigma_{HP})_K$ – коефіцієнт напруженості зубців циліндричної передачі; 20) $\mu_{\sigma_{Ц}} = (\sigma_H / \sigma_{HP})_{Ц}$ – коефіцієнт напруженості зубців циліндричної передачі;

Обрані критерії якості характеризують масо-габаритні показники редуктора (1-3) і приводу в цілому (4-8), технічний рівень редуктора (10), як основного вузла приводу, надійність роботи підшипників (18), досконалість конструкції валів (15,16), оптимальність спроектованих зубчастих передач з погляду напруженості їх зубців (19,20) і з погляду плавності роботи конічної передачі (17), домірність вузлів приводу, що впливає на його зовнішній вигляд (9), можливості поліпшення конструкції приводу (14). Критерії (11-13) характеризують масо-габаритні показники відкритої циліндричної передачі.

Вибір методу проектування. Для оптимально-раціонального проектування технічного об'єкту пропонується використовувати ідею методу *ЛП_r* послідовностей // Суть методу допустимих множин для наочності розглянемо на прикладі двохкритеріальної задачі (рис. 2).

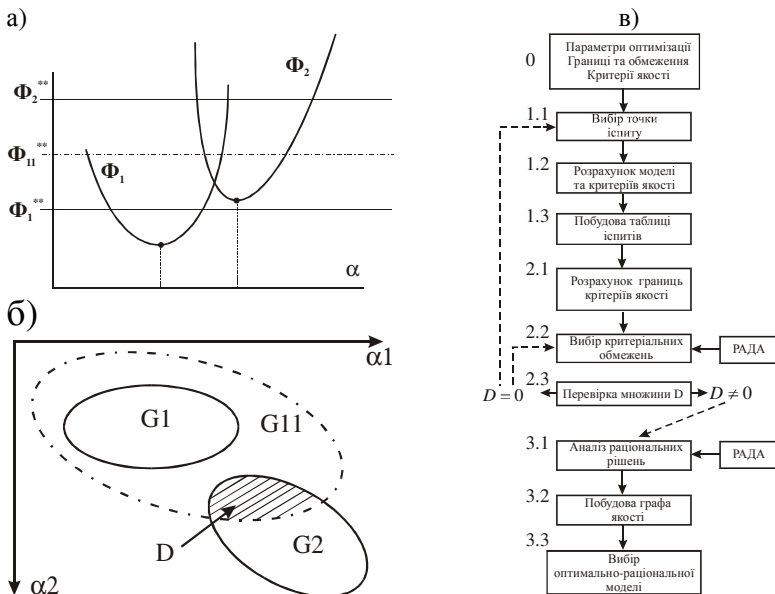


Рис.2

Хай критерії якості Φ_1, Φ_2 мають вид (рис.2а). Згідно до технічного завдання на проектування встановлені обмеження критеріїв якості Φ_1^*, Φ_2^* . Цим обмеженням відповідають якість множини варійованих параметрів $G1(\alpha)$ і $G2(\alpha)$ (рис.2,б). Якщо множини $G1(\alpha)$ і $G2(\alpha)$ не перетинаються то задача проектування не має рішення. Але коли змінити критеріальні обмеження $\Phi_1^* \Rightarrow \Phi_{11}^*$ то змінюється множина параметрів $G1(\alpha) \Rightarrow G11(\alpha)$ і можна знайти множину $D(\alpha)$, як результат перетинання $G2(\alpha)$ і $G11(\alpha)$. Множина $D(\alpha)$ є множиною допустимих рішень. Параметри $\alpha_p \in D$ визначають варіанти спроектованого технічного об'єкту, який задовольняє усім критеріальним обмеженням тобто технічному завданню. Подальший аналіз Парето-множини $D(\alpha_p)$ компромісно оптимальних проектів, наприклад, з використанням евристичних підходів [8] дозволяє вибрати оптимально-раціональний варіант проекту технічного об'єкта $\alpha_{opt} \in S(\alpha_p)$. Структурна схема методу допустимих множин наведена на рис.2, в.

Результати проектування. Запропонований метод було використано для проектування електромеханічного приводу з зубчастими передачами. У табл.2 наведені деякі дані (частково) по змісту допустимої множини $D(\alpha_p)$ у разі використання електродвигуна з частотою обертання 1500об/хв. На рис. 3

наведено граф якості, який дозволяє порівняти оптимально-раціональні варіанти проектування приводу для різних електродвигунів і вибрати оптимальний.

Множина $D1$ раціональних варіантів приводу Таблица 2

Номер критерія Φ_i	Номер точки іспиту			
	160	176	224	240
1	487,5	416.2	434.6	441.5
2	228,1	363.8	385.2	391.1
3	293,0	296.5	296.5	296.5
4	158,1	39.43	41.16	42.22
5	1306	1002.0	1021.0	1028.0
6	330,0	830.0	830.0	830.0

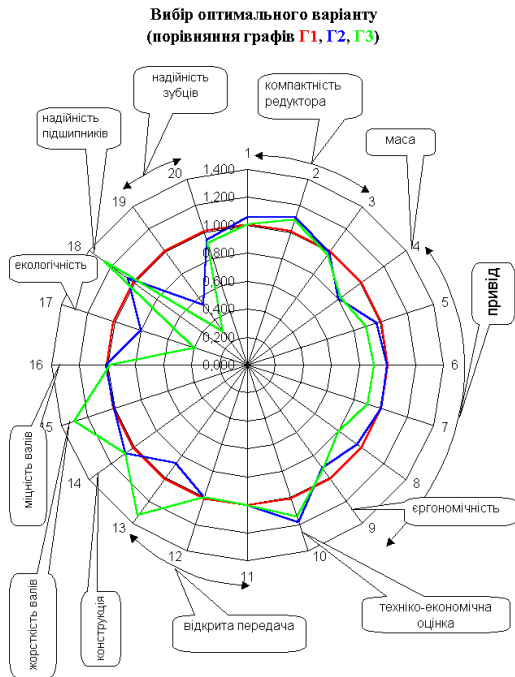


Рис.3

ВИСНОВКИ.

1. Розроблена методологія оптимального проектування технічного об'єкту, зокрема, електромеханічного приводу з зубчастими передачами.
2. Для рішення задачі оптимального проектування електромеханічного приводу запропоновано використовувати сучасний прямий метод допустимих множин, який дозволяє при виборі оптимально-раціональних

рішень не обмежувати кількість критеріїв якості і враховувати кожний з них, а також та керувати процесом вибору оптимально-раціонального рішення.

3. Побудовано граф якості приводу, що містить 20 критеріїв якості і характеризує масо-габаритні показники приводу, показники надійності роботи підшипників та зубчастих передач, міцності та жорсткості валів, еколого-ергономічні показники, техніко-економічний рівень тощо, і який може найти широке практичне використання.

4. Обґрунтовано оптимально-раціональний за вибраними критеріями якості варіант параметрів приводу. Зокрема, в оптимальному варіанті вдалося скоротити довжину та ширину приводу, відповідно, на 245 мм (16%) і на 170 мм(34%); загальна маса приводу зменшилася на 32кг (17%) проти варіанту, який проектувався за звичайними традиційними методами.

Список літератури. 1. *Фролов К.В.* Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.:Машиностроение. - 1984, 224с. 2. *Реклейтис Г., Рейвиндран А.,* Регсдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Пер. с англ. М.: Мир.-1986, 350с. 3. *Хог Э., Арора Я.* Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции. М.: Мир.-1983, 480с. 4. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука.-1981,110с. 5. *Заблонський К.І.* Деталі машин.– Одеса: Астропринт, 1999. 404с. 6. Дослідження та проектування електромеханічних приводів./ *Гапонов В.С., Калінін П.М. та ін.* – Х.: НТУ “ХПІ”, 2000.- 202с. 7. *Киркач Н.Ф., Баласанян Р.А.* Расчет и проектирование деталей машин. –Х.: Основа. - 1991.-276с. 8 *Мюллер И.* Эвристические методы в инженерных разработках. М.: Радио и связь. - 1984. 144с.

Поступила в редакцію 30.04.06

УДК 621.831

Л.В. КУРМАЗ, к.т.н, Політехніка Свентокшистська в Кельцах (Польща)

П.Н. КАЛИНИН, к.т.н, Академія внутрішніх військ МВС України (Харків, Україна)

О.Л. КУРМАЗ (Харків, Україна)

НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДИСКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

У статті представлені деякі рекомендації з конструювання зубчастих коліс дискової конструкції з метою зменшення нерівномірності розподілу навантаження по ширині вінця колеса за рахунок зміни товщини вінця і диска, а також параметра, що визначає положення диска щодо вінця.

In this paper some recommendations for constructing toothed wheels of a disk construction are submitted. The recommendations are intended for reduction of non-uniformity of distribution of loading on width of toothed wheel ring at the expence of change of thickness of a ring and disk, and also parameter, defining position of a disk concerning a ring.