УДК 621.9.06

В.М. Чуприна

Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, Чернігів

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПОНОВОК ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ НА ОПОРАХ КОЧЕННЯ

Розглянуто принципи оптимізації компоновок параметричних 3D-моделей шпиндельних вузлів металорізальних верстатів на опорах кочення за статичними і динамічними показниками. Визначені базові варіативні параметри шпиндельних вузлів при їх конструюванні в системах автоматизованого проектування. Розроблені методики оптимізації конструкцій.

Ключові слова: *методика, ідентифікація, аналіз, висотно-швидкісні характеристики, випробування, регресія, математична модель.*

Вступ

Постановка задачі. Динамічна якість металорізального верстата у великій мірі визначається динамічною якістю основних вузлів, зокрема – шпиндельних вузлів (ШВ) [3, 6]. Дослідженню пружних властивостей ШВ присвячено багато робіт вітчизняних і закордонних дослідників [2, 3, 7, 8].

Під час проектування ШВ в системах автоматизованого проектування (САПР), необхідно вибрати найкращий варіант серед можливих варіантів конструкцій [5]. Пошук такого варіанту забезпечується переборними процедурами структурного та параметричного синтезу. При цьому виконується варіювання різних конструктивних параметрів вузла з оцінкою кожного варіанту за вихідними показниками (критеріями). Таким чином забезпечується параметрична оптимізація конструкції ШВ.

Метою статі є дослідження можливостей параметричної оптимізації компоновок шпиндельних вузлів металорізальних верстатів в САПР за статичними і динамічними показниками при використанні параметричних 3D-моделей.

Основний матеріал

Оптимізація (optimization) компоновок ШВ – це знаходження найкращого варіанту вирішення задачі підбору компоновочних параметрів ШВ при заданих вимогах, умовах і обмеженнях. В математиці задачі оптимізації зазвичай формулюються як пошук екстремуму (максимуму чи мінімуму) заданої цільової функції [1, 4]. Цільова функція (функція мети) тут є апріорі відомою і зазвичай задається аналітичною залежністю від одного чи декількох незалежних аргументів (параметрів).

Якщо на множині X з n-мірного евклідового простору R^n визначена функція F{X}, яка має екстремальні точки, то задача оптимізації полягає в пошуку екстремумів даної цільової функції

$$\underset{X \in R^n}{\mathrm{Extr}}\ F(X). \qquad (1)$$

В подальшому будемо розглядати тільки задачу мінімізації функції, до якої можна звести також і задачу пошуку максимуму функції

$$\min_{X \in R^n} F(X). \qquad (2)$$

Розв'язок задачі оптимізації полягає в знаходженні глобального мінімуму X*, де цільова функція має найменше значення на всій допустимій області

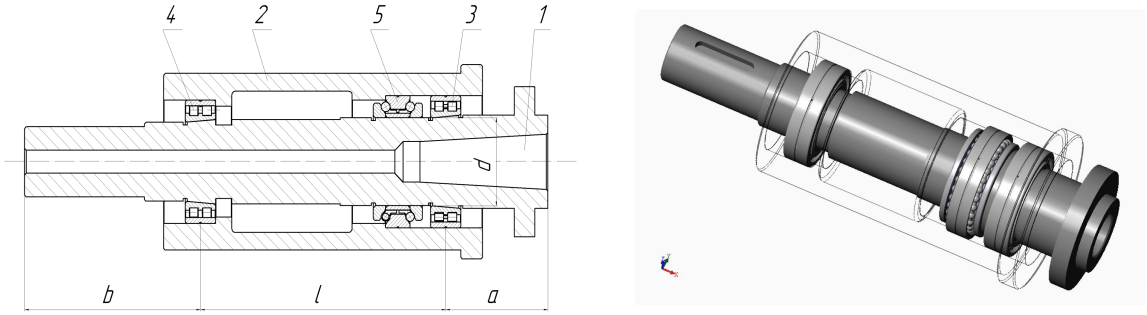
$$F(X^*) \le F(X), \forall X \in R^n. \qquad (3)$$

Цей пошук може виконуватися різними методами [1, 2, 5]. З попередніх досліджень відомо, що для ШВ існують раціональні значення базових компоновочних параметрів ШВ по статичних та динамічних характеристиках. Таким чином, під час проектування ШВ в САПР існує сенс проведення математичного моделювання конструкції з метою її вдосконалення. Для отримання найбільш якісних вихідних показників ШВ необхідно розробити параметричну 3D-модель вузла, здійснити його параметричне моделювання та вирішити задачу параметричної оптимізації конструкції. В якості об’єктів для оптимізації прийняті комплектні шпиндельні вузли (КШВ) конструкції ЭНИМС різних варіантів виконання – звичайні, силові, швидкісні, тихохідні (в залежності від призначення вузла і типу підшипників кочення). Основні принципи параметризації конструкцій ШВ в системі KOMPAS-3D розглянемо на прикладі одного з типів КШВ.

На рис. 1, а показана структурна (компоновочна) схема параметричної моделі КШВ, а на рис. 1, б – приклад спрощеної конструкції вузла, яка складена тільки з основних (базових) деталей. Вона містить такі основні елементи: 1 – шпиндель; 2 – корпус; 3 – передній радіальний підшипник типу 3182000; 4 – задній радіальний підшипник типу 3182000; 5 – упорно-радіальний підшипник типу 178000. В повній 3D-моделі КШВ до основних елементів конструкції додається багато інших необхідних елементів: фланці, дистанційні кільця, гайки, ущільнювачі і інші. Всі деталі і збірні елементи в моделі підлягають повній параметризації.

На рис. 2 показана схема формування збірної параметричної 3D-моделі силового варіанту КШВ в системі KOMPAS-3D.

© В.М. Чуприна



а б

Рис. 1. Структурна схема (а) та спрощена конструкція (б) КШВ

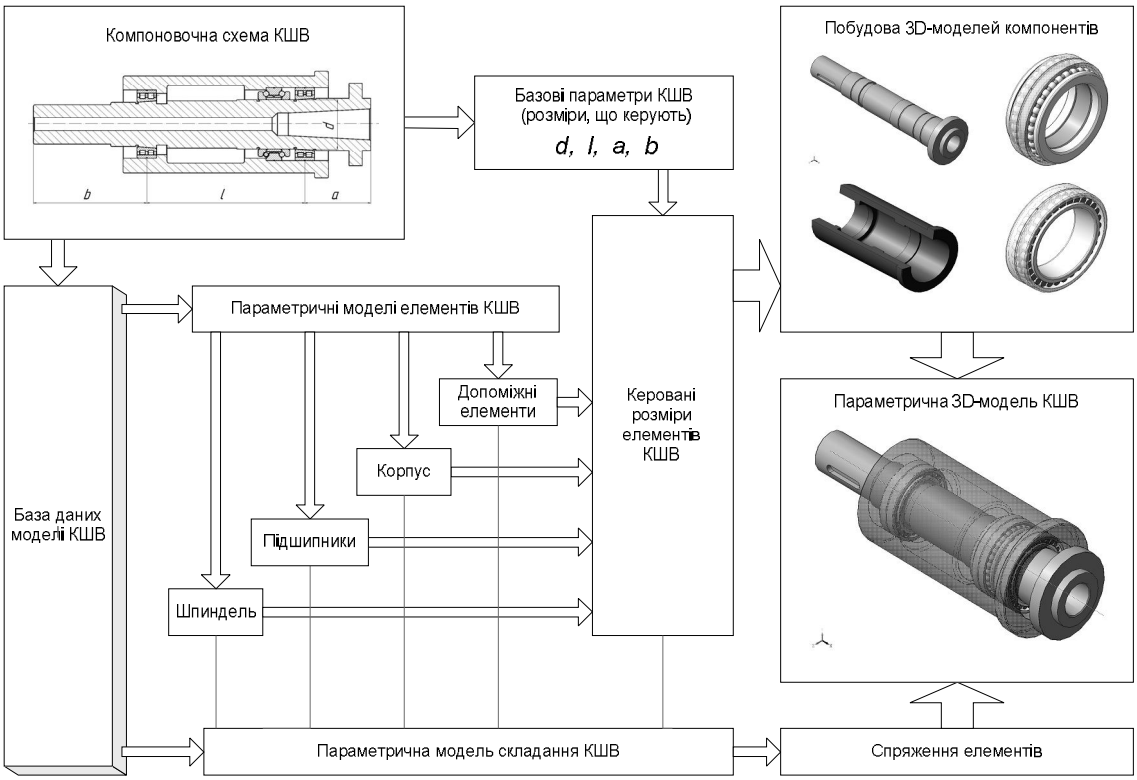
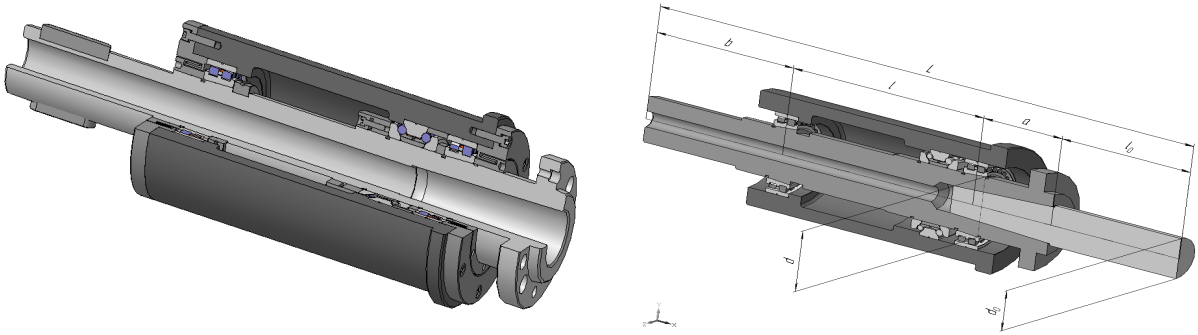


Рис. 2. Формування параметричної моделі КШВ

Параметризація дозволяє багаторазово використовувати один раз створену параметричну 3D-модель КШВ, що значно скорочує час на побудову нових її модифікацій, зокрема при моделюванні. Крім того, якщо для базових параметрів задати нормалізовані ряди розмірів, то за допомогою однієї параметричної 3D-моделі можна створити необмежений ряд типових конструкцій КШВ, який охоплює весь розмірний ряд для цілої гами верстатів одного типу.

Повна параметрична 3D-модель КШВ показана на рис. 3, а, а спрощена (з оправкою) – на рис. 3, б.



а б

Рис. 3. Параметрична 3D-модель КШВ: а – повна; б – спрощена (з оправкою)

В параметричній моделі для даного вузла розробляється компоновочна схема, з аналізу якої визначаються усі керуючі параметри КШВ. Це − головні розміри, які керують усіма іншими розмірами 3D-моделі КШВ. В даному випадку базовими параметрами визначені nfri:

a – виліт консолі шпинделя,

l – відстань між радіальними опорами (серединами опор),

d – діаметр шпинделя в передній опорі,

b – довжина хвостовика шпинделя. Є також і інші (додаткові):

l_o – довжина інструментальної оправки;

d_o – діаметр інструментальної оправки. Цим розмірам призначаються відповідні змінні, які розглядаються як базові варіативні параметри 3D-моделі КШВ. Розміри інших деталей пов'язані параметричними співвідношеннями з цими основними параметрами.

Для проведення оціночного моделювання застосовувалась спрощена параметрична 3D-модель КШВ (рис. 3, б).

При моделюванні КШВ дрібні допоміжні елементи не враховувались. Проте, при остаточних розрахунках усі елементи враховуються обов'язково.

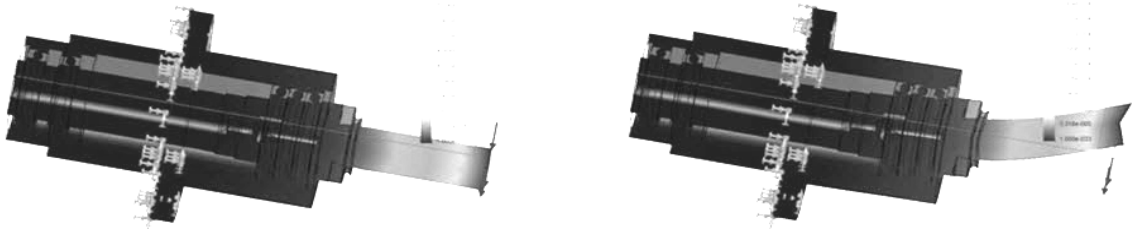
Дослідження з параметричної оптимізації з одним варіативним параметром проводились в CAD-CAE системі SolidWorks/CosmosWorks, яка широко використовується для автоматизованого проектування різних конструкцій, в тому числі верстатів і їх вузлів. Можливість оптимізації 3D-моделей об'єктів закладена в самій системі SolidWorks/CosmosWorks [9, 10]. Проте її оптимізаційні можливості використовуються досить обмежено.

Для здійснення оптимізації ШВ в CAD системі SolidWorks були розроблені параметричні 3D-моделі модифікованих КШВ для обробляючого центру ИР500ПМФ4 (з іншою конструкцією корпусу).

Розрахунки статичних та динамічних показників КШВ виконувалися в CAD-CAE системі SolidWorks у вбудованому додатку CosmosWorks за допомогою методу кінцевих елементів. Система CosmosWorks дозволяє проводити оптимізацію як окремих деталей, так і збірних конструкцій.

Для вирішення поставленої задачі параметричної оптимізації ШВ по статичних та динамічних показниках в якості основного варіативного параметру використовувалась відстань між серединами опор l . Вона змінювалась в широкому діапазоні (від 200мм до 400мм) з кроком 25мм. При цьому знаходилась зона розташування оптимуму міжопорної відстані при якій досягається максимальна власна частота і жорсткість шпинделя.

Приклади розрахунку наведені на рис. 4, а результати – в табл. 1. На рис. 5 показані побудовані графіки результатів статичної та динамічної оптимізації КШВ. Аналіз графіків показує, що статичні і динамічні оптимальні міжопорні відстані існують, але для різних довжин оправок вони не співпадають. Зокрема для КШВ, що працюють переважно з довгими оправками краще використовувати конструкцію з міжопорною відстанню в межах 240 – 260 мм. Для верстатів, що працюють з оправками малої довжини, раціональна міжопорна відстань лежить в межах 320 – 330 мм.



а б

Рис. 4. Результати розрахунків базового варіанту КШВ (з довгою оправкою):
а – статичні переміщення; б – форма коливань на частоті 817 Гц

Таблиця 1

Результати проведених досліджень

N п/п	l , мм	Коротка оправка l_o =50мм		Довга оправка l_o =200мм	
		y, мм	f, Гц	y, мм	f, Гц
1	200	0,004437	1521,14	0,075022	817,95
2	225	0,004204	1530,05	0,073617	817,69
3	250	0,003780	1542,22	0,066834	817,80
4	275	0,004103	1544,61	0,064819	817,46
5	300	0,004622	1547,17	0,063203	817,89
6	325	0,004716	1555,84	0,060748	817,74
7	350	0,005331	1531,77	0,062156	817,51
8	375	0,004437	1509,13	0,063812	817,28
9	400	0,004437	1487,21	0,072342	817,13

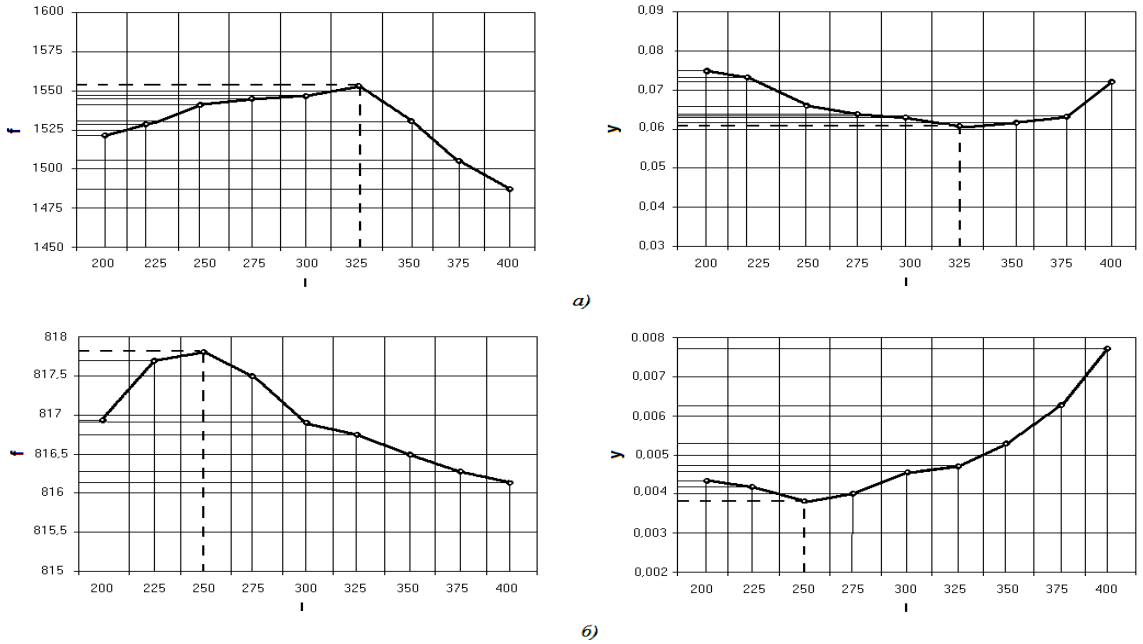


Рис. 5. Графіки залежності першої резонансної частоти f (Гц) та статичної деформації оправки y (мм) від міжопорної відстані l : а – з короткою оправкою (50мм); б – з довгою оправкою (200мм)

Розглянута вище однопараметрична оптимізація − це найпростіший вид оптимізації, при якій змінюється лише один варіативний параметр. Проте, більш якісною є багатопараметрична оптимізація, в якій враховано більше варіативних параметрів – n (n≥2). Наприклад, під час проектування ШВ важливим завданням є знаходження раціональних конструктивних (компоновочних) параметрів вузла a, l, d . Оцінювання тут також проводиться за єдиним критерієм.

Не існує прямих математичних залежностей між значеннями параметрів і характеристиками (показниками) ШВ. Тому вирішимо цю задачу із застосуванням сучасної математичної теорії оптимального планування експерименту, зокрема планування екстремального експерименту з метою параметричної оптимізації об'єкту. Однак, зі збільшенням числа параметрів кількість експериментів різко зростає. Тому для зменшення загального обсягу експериментів доцільно застосовувати методи планування експериментів, зокрема використовувати дрібно-факторні репліки планів. На стадії проектування ШВ будемо використовувати розрахункові експерименти, які виконані при параметричному моделюванні ШВ.

При багатофакторному експерименті потрібно знайти значення чинників такі, при яких відгук системи набуває значень Y_{min} або Y_{max}. Для цього треба за результатами експерименту побудувати цільову функцію відгуку (функцію мети)

$$Y = Y(X_1, X_2, ..., X_n), \; n \geq 2, \qquad (4)$$

де $X_1, ..., X_n$ – параметри, що пов'язані з конструктивними параметрами ШВ.

Задача оптимізації зводиться до знаходження вектора оптимальних значень параметрів $X_{опт}$, що забезпечують екстремум цієї функції

$$Y_{опт} = Y(X_1^*, X_2^*, ..., X_n^*). \qquad (5)$$

Таким чином, завданням оптимізації є знаходження екстремуму функції відгуку за тієї умови, що сама функція апріорі невідома. Для знаходження цільової функцію відгуку виду (1) проводиться повний (або частковий) факторний експеримент за результатами якого будується нелінійна модель функції відгуку. Вона є гіперповерхнею у багатомірному просторі параметрів конструкції, яка може мати екстремальні зони. Потім для цієї функції знаходиться екстремум, для чого використовують відомі методи оптимізації. В результаті визначаються значення усіх раціональних параметрів ШВ, як елементів вектора $X_{опт}$. З метою параметричної оптимізації властивостей багатокомпонентної системи ШВ застосуємо математичну теорію оптимального планування експерименту. Для цього проведемо серію розрахункових експериментів при зміні цих параметрів з визначенням динамічних характеристик (показників).

Виконані попередні розрахунки показують, що найбільш впливовими параметрами на характеристики ШВ є l і d (при постійному значенні a), до того ж при зміні цих параметрів статична і динамічна податливість мають оптимальні значення (приблизно при l = 300мм і d = 100мм).

Скористаємося плануванням другого порядку для опису поверхні відгуку адекватної математичної моделі за допомогою нелінійних рівнянь. При двох факторах загальний вигляд функції відгуку із застосуванням поліномів другого порядку буде таким

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^{k} B_i \cdot X_i + \sum_{i=1, i<j}^{k} B_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^{k} B_{ii} \cdot X_i^2,$$

де B_0, B_{ij}, B_{ii} – коефіцієнти поліному; i – номер

фактору; j – номер експерименту (точка матриці планування).

Кількість коефіцієнтів B розраховується як $l = 0,5 \cdot (k+1) \cdot (k+2)$. Тоді поліном містить 6 невідомих коефіцієнтів B і має вигляд

$$Y(X_1, X_2) = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \\ + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2. \quad (6)$$

Для розрахунку невідомих коефіцієнтів B цієї моделі і визначення такої поверхні відгуку фактори повинні варіюватися на трьох рівнях.

Експеримент в цьому випадку вимагає не менше шести дослідів для двох чинників (по числу коефіцієнтів в рівнянні 6).

Щоб не розраховувати всі експерименти, в якому кожний фактор визначається не менше чим на трьох рівнях, скористаємось ортогональним центральним рототабельним композиційним плануванням.

На рис. 6 показана схема та матриця планування другого порядку. Для $k = 2$ величина "зоряного плеча" $\alpha = 1$. Кількість дослідів при центральному ортогональному композиційному плануванні визначається по формулі

$$N = N_я + 2 \cdot k + N_0, \quad (7)$$

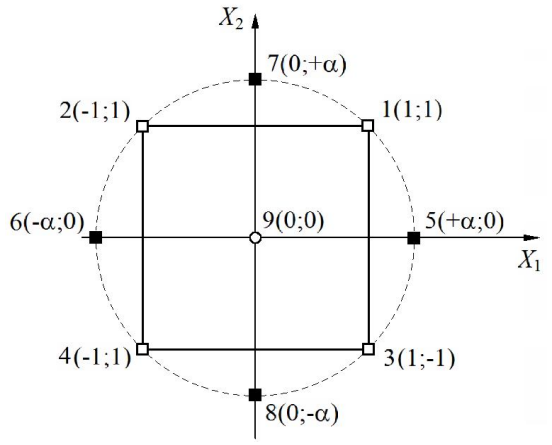
де $N_я$ – число дослідів ядра плану; $2k$ – число дослідів в "зоряних" точках; N_0 – кількість експериментів на основному (нульовому) рівні.

Величини невідомих коефіцієнтів B розраховуються за виразами:

$$B_0 = a_1 \cdot \sum_{j=1}^{N} Y_j - a_2 \cdot \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{N} (X_{ij}^2 \cdot Y_j);$$

$$B_i = a_3 \cdot \sum_{j=1}^{N} (X_{ij} \cdot Y_j); \quad B_{ij} = a_4 \cdot \sum_{j=1}^{N} (X_{ij} \cdot X_{ji} \cdot Y_j); \quad (8)$$

$$B_{ii} = a_5 \cdot \sum_{j=1}^{N} (X_{ij}^2 \cdot Y_j) + a_6 \cdot \sum_{i-1}^{K} \sum_{j=1}^{N} (X_{ij}^2 \cdot Y_j) - a_7 \cdot \sum_{j=1}^{N} Y_j.$$



а

Значення коефіцієнтів a_m: 0,2; 0,1; 0,125; 0,25; 0,1251; 0,0187; 0,1438.

Для досліджуваного ШВ варіювання проводимо двома зовнішніми параметрами – діаметром d шпинделя та відстанню l між опорами. На початку планування визначаємо діапазони варіювання кожного з параметрів. Враховуючи максимально можливі діапазони варіювання d та l, приймаємо d_{min} =80 мм, d_{max} =120 мм, l_{min} =160 мм та l_{max} =400 мм. Середні значення для нульової точки (точка 9) – $d_{сер} = 100$ мм, $l_{сер} = 280$ мм.

Після розрахунку координат усіх точок плану і складення матриці планування визначимо необхідні експериментальні значення Y. За допомогою програми Dynamo-S розраховуємо АФЧХ ШВ в усіх експериментальних точках згідно плану.

Приклад АФЧХ для точки 1 показаний на рис. 7, а. З кожної АФЧХ визначимо основні показники, зокрема статичний коефіцієнт $K_{ПС}$, максимальні резонансні частоти ω_p та амплітуди A_p. Більша частина характеристик в заданому частотному діапазоні 0 – 1000Гц має тільки один резонанс. Таким чином, будемо мати три набори експериментальних координат Y з 13 елементів кожний для трьох поверхонь відгуку. Значення отриманих координат Y для цих параметрів приведені в таблиці на рис. 7, б.

Розрахунок функцій і поверхонь відгуку параметричної моделі ШВ виконувався за допомогою пакету Mathcad. Для кожного показника розрахуємо значення невідомих коефіцієнтів B за формулами (8) та запишемо вирази для функцій відгуку.

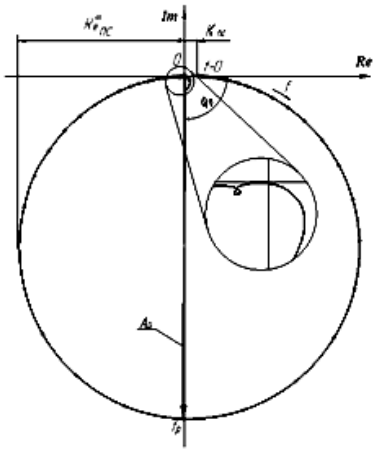
Для статичної податливості $K_{ПС}$ функція відгуку має вигляд

$$Y_1 = 0,0189 - 0,00433X_1 - 0,00107X_2 - \\ -0,00055X_1X_2 + 0,000211X_1^2 + 0,00171X_2^2. \quad (9)$$

№	X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	X_1^2	X_2^2	Y
1	+	+	+	+	+	+	Y_1
2	+	-	+	-	+	+	Y_2
3	+	+	-	-	+	+	Y_3
4	+	-	-	+	+	+	Y_4
5	+	$+\alpha$	0	0	α^2	0	Y_5
6	+	$-\alpha$	0	0	α^2	0	Y_6
7	+	0	$+\alpha$	0	0	α^2	Y_7
8	+	0	$-\alpha$	0	0	α^2	Y_8
9	+	0	0	0	0	0	Y_9
10	+	0	0	0	0	0	Y_{10}
11	+	0	0	0	0	0	Y_{11}
12	+	0	0	0	0	0	Y_{12}
13	+	0	0	0	0	0	Y_{13}

б

Рис. 6. Центральне композиційне планування другого порядку (при $k = 2$):
а – схема плану; б – матриця плану



№ точки	$K_{ПС}$	ω_{p1}	A_{p1}	d	l
1	0,0168	494,0	0,1991	110	365
2	0,0262	453,7	0,5922	90	365
3	0,0198	458,0	0,2533	110	195
4	0,0270	438,7	0,4835	90	195
5	0,0170	480,3	0,2002	114	280
6	0,0298	431,5	0,7189	85	280
7	0,0209	482,0	0,3449	100	365
8	0,0243	441,1	0,3528	100	195
9	0,0189	481,3	0,2488	100	280
10	0,0189	481,3	0,2488	100	280
11	0,0189	481,3	0,2488	100	280
12	0,0189	481,3	0,2488	100	280
13	0,0189	481,3	0,2488	100	280

а б

Рис. 7. Приклад АФЧХ ШВ в точці 1– а та параметри усіх АФЧХ – б

Для першої резонансної частоти ω_{p1} –

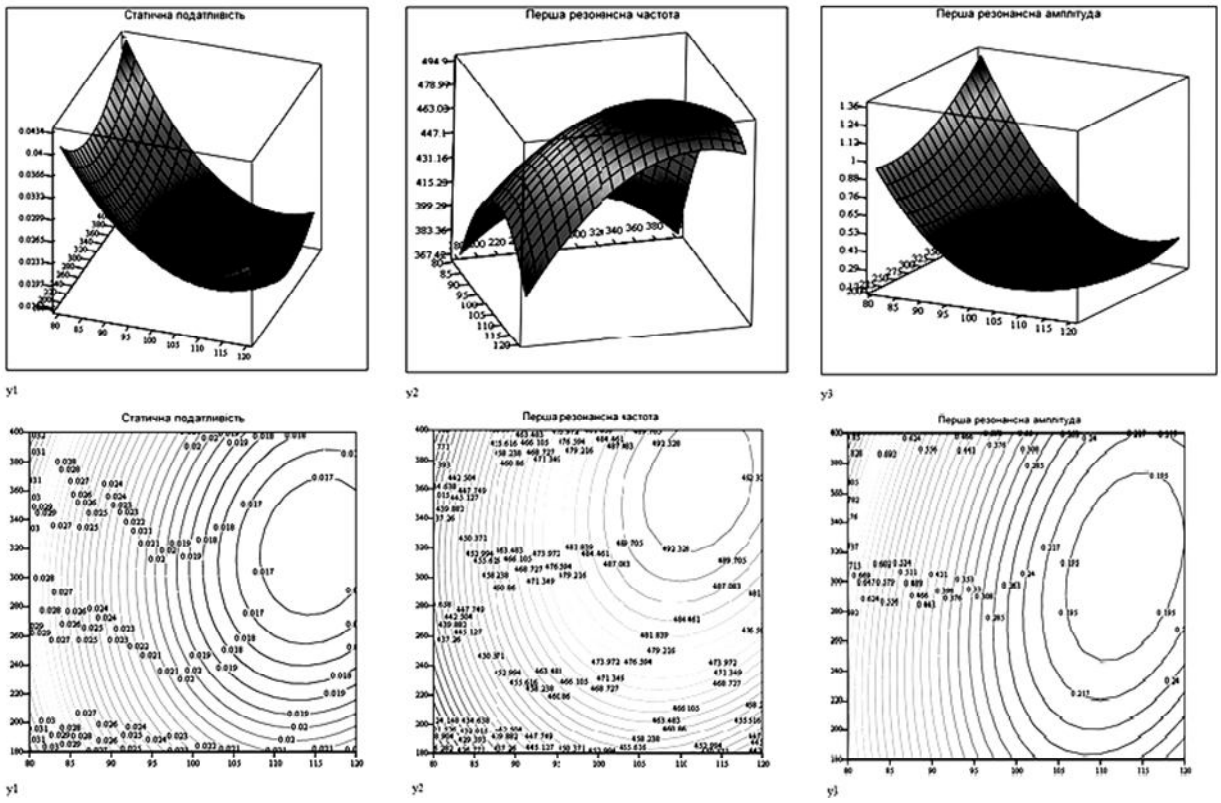
$$Y_2 = 481,3 + 16,051X_1 + 13,58363X_2 + +5,25X_1X_2 - 12,10738X_1^2 - 9,28012X_2^2. \quad (10)$$

Для першої резонансної амплітуди A_{p1} –

$$Y_3 = 0,2488 - 0,16933X_1 + 0,00542X_2 - -0,04072X_1X_2 + 0,09985X_1^2 + 0,04446X_2^2. \quad (11)$$

Графіки функцій відгуку другого порядку побудовані в пакеті Mathcad і подані на рис. 8.

З аналізу цих графіків можна знайти оптимальні параметри ШВ, які визначаються координатами центрів внутрішніх еліпсів (на графіках зображень ліній рівних рівнів). Проте, для більшої точності їх необхідно розраховувати аналітично, з використанням відомих методів оптимізації.



а б в

Рис. 8. Поверхні відгуку: а – статична податливість – $K_{ПС}$;
б – перша резонансна частота – ω_{p1} ; в – амплітуда першого резонансу – A_{p1}

Знайдемо оптимальні значення параметрів d і l по відповідних значеннях X_1 і X_2 різними методами. Визначення оптимальних параметрів ШВ d і l пов'язане із знаходженням екстремального значення

нелінійної багатопараметричної цільової функції відгуку (1), яка задана в n-мірному евклідовому просторі R^n і являє собою гіперповерхню n-го порядку

$$\underset{X \in R^n}{\text{Extr}}\ Y(X_1, X_2, ..., X_n). \qquad (12)$$

Будемо розглядати задачу мінімізації цільової функції. Існує багато методів знаходження екстремуму цієї функції. Серед них можна застосовувати прямі методи (координатного спуску, Розенброка, симплексний метод Нелдера-Мида і інші), градієнтні методи (найшвидшого спуску, важкої кульки, Ньютона-Рафсона і інші), метод випадкового пошуку (Монте-Карло). Для задач, в яких функція є нелінійною (особливо з розривами чи суттєвими нелінійностями), доцільно використовувати прямі (не градієнтні) методи. Тому, застосуємо для оптимізації метод координатного спуску. Для цього була розроблена спеціальна програма для параметричної оптимізації ШВ SPINDLE OPTIMIZATION, яка представлена на рис. 9. В результаті оптимізації знайдені раціональні значення варіативних параметрів, які приведені на рис. 9, в.

Висновки

Розроблена методологія оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів по статичних і динамічних показниках забезпечує вибір раціональних компоновочних параметрів конструкції на основі оптимізації їх параметричних 3D-моделей.

Оптимізаційні параметри ШВ залежать від типу і призначення металорізального верстату, а також від виду технологічного оснащення (зокрема інструменту та інструментальних оправок). При цьому зі збільшенням відстані між опорами шпинделя статична і динамічна податливість ШВ спочатку зменшується, а потім зростає. Тобто, існує раціональне значення, яке для різних видів інструментальних оправок може суттєво відрізнятись.

CAD-CAE система SolidWorks з вбудованим пакетом CosmosWorks дозволяє не тільки виконувати автоматизоване проектування ШВ і інших об'єктів, але й проводити раціональний вибір їх конструктивних параметрів за різними критеріями оптимізації ще на стадії проектних розробок в САПР.

Розроблені методи багатопараметричної оптимізації ШВ за статичними та динамічними показникам на основі теорії оптимального планування експерименту доцільно застосовувати в САПР шпиндельних вузлів при конструюванні на основі параметричних 3D-моделей.

Список літератури

1. *Аттетков А.В. Методы оптимизации / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. – Из-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001.*
2. *Данильченко Ю.М. Прецизійні шпиндельні вузли на опорах кочення / Ю.М. Данильченко, Ю.М. Кузнєцов. – Тернопіль.: Економічна думка, 2003 – 342 с.*
3. *Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967 – 360 с.*
4. *Нинул А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента / А.С. Нинул. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2009. – 336 с.*
5. *Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР: учебн. для втузов / И. П. Норенков, В.Б. Маничев. – М.: Изд-во МГТУ, 2009. – 430 с.*
6. *Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручн. / В.Б. Струтинський. – Житомир, ЖИТІ, 2001. – 612 с.*
7. *Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В.Б. Струтинський, Д.Ю. Федориненко. – Ніжин: Вид-во „Аспект-Поліграф, 2011. – 464 с.*
8. *Хомяков В.С. Моделирование и расчет динамических характеристик шпиндельных узлов / В.С. Хомяков, Н.А. Кочинев, Ф.С. Сабиров // Вестник УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2009. – Т. 12. – № 2(31). – С. 69-75.*

Надійшла до редколегії 14.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ю. Федориненко, Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВОК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

В.М. Чуприна

Рассмотрены принципы оптимизации компоновок параметрических 3D-моделей шпиндельных узлов металлорежущих станков на опорах качения по статическим и динамическим показателям. Определены базовые вариативные параметры шпиндельных узлов при их конструировании в системах автоматизированного проектирования. Разработаны методики оптимизации конструкций.

Ключевые слова: *металлорежущий станок, шпиндельный узел, параметрическая 3D-модель, компоновка, оптимизация, методика, статика, динамика, показатели.*

PARAMETRIC OPTIMIZATION CONFIGURATIONS SPINDLE UNITS MACHINE TOOL FOR BEARING UNITS

V.M. Chupryna

Principles of parametric optimization of layouts of 3D-models of spindles of machine tools on legs of a rolling on the static and dynamic parameters were considered. The basic parameters of divergent spindle assemblies in their design in CAD systems have been identified. Techniques to optimize designs have been developed.

Keywords: *cutting machine, spindle, parametric 3D-model, layout, optimization, methods, statics, dynamics, performance.*