

УДК 621.9.06:621.941:621.9-112.5

В.М. Чуприна, канд. техн. наук**О.М. Говоруха**, бакалавр

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАЗОВИХ КОМПОНОВОЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ НА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ В САПР

Виконані порівняльні розрахунки динамічних характеристик різних варіантів шпиндельних вузлів на опорах кочення. Встановлено вплив основних компоновочних параметрів на динамічні характеристики. Це дозволяє забезпечити раціональний вибір компоновок шпиндельних вузлів під час проектування в САПР.

Вступ

Підвищення точності, продуктивності і рівня автоматизації металорізальних верстатів потребує забезпечення стабільності роботи всіх їх вузлів. Найбільш відповідальними у верстатах є шпиндельні вузли, які значною мірою (до 70-90%) визначають якість металорізальних верстатів. Одними з найважливіших показників якості верстатів є динамічні показники, які визначаються за відповідними динамічними характеристиками [3]. При цьому динамічні характеристики верстатів і їх вузлів можна отримувати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом [1;4;5;7].

Найбільша доцільність динамічного розрахунку проявляється під час проектування нових моделей верстатів та їх вузлів на стадії оптимізації, коли виникає необхідність у швидкій оцінці розроблених конструкцій за динамічними критеріями (наприклад, при виборі кращого варіанту з ряду конструкцій). Динамічний розрахунок є інформативним і дозволяє отримати дані про статичну жорсткість, динамічну податливість, власні частоти, форми коливань конструкції, коефіцієнти динамічності та інші параметри якості, а також дозволяє виявити “слабкі місця” розробленої конструкції. Крім того, розрахунковий шлях є також і найбільш економним – він дозволяє проводити повне імітаційне моделювання конструкції і не потребує виготовлення експериментальних зразків для проведення досліджень [6].

Під час проектування шпиндельних вузлів верстатів (наприклад, у САПР) часто виникає задача вибору і параметричної оптимізації основних компоновочних параметрів вузла [5]. Від їх раціонального призначення великою мірою залежать точність, жорсткість, вібробійність конструкції, а також ефективність обробки на верстаті в цілому (причому як при чистових, так і при чорнових динамічних режимах обробки деталей) [3].

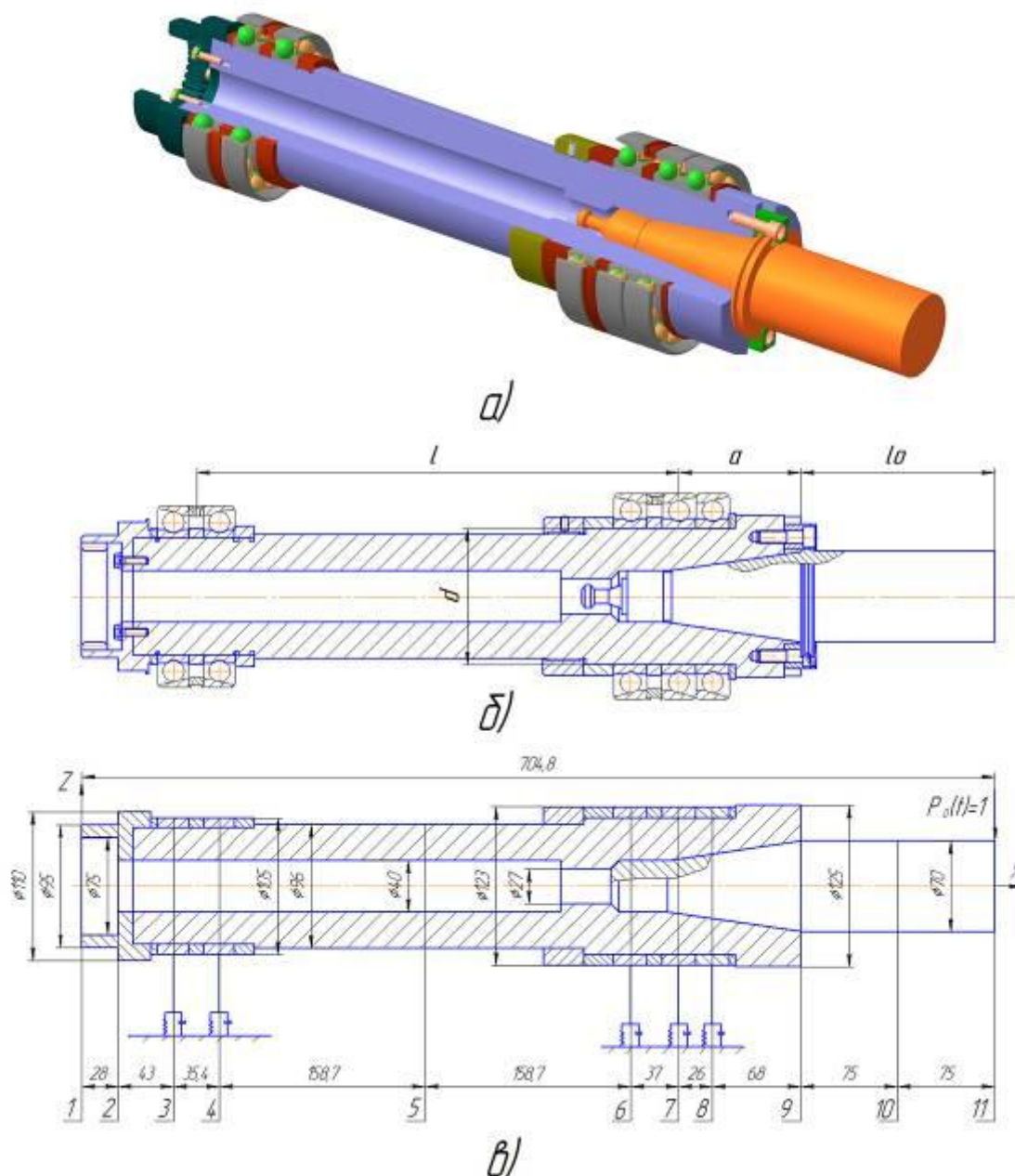
Мета статті

Основою метою даної роботи є дослідження впливу основних компоновочних параметрів шпиндельних вузлів (зокрема: діаметра шпинделя, міжопорної відстані, довжини консолю) на динамічні характеристики для їх раціонального вибору під час проектування шпиндельних вузлів.

Для реалізації цієї мети необхідно розробити конструкції та скласти динамічні моделі шпиндельних вузлів, провести динамічні розрахунки і визначити статичну податливість, резонансні частоти й амплітуди коливань переднього кінця шпинделя та знайти оптимальні значення міжопорних відстаней для різних діаметрів шпинделів. На базі проведених розрахунків слід побудувати графіки залежності оптимальних значень основних динамічних показників від міжопорної відстані (при різних діаметрах шпинделя). На основі отриманих результатів можна зробити висновки про оптимальні значення міжопорних відстаней з метою їх наступного використання під час оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів.

Методи і результати

У даній роботі проведено динамічні дослідження однієї з типових компоновок шпиндельних вузлів багатоцільового верстату моделі IP500ПМФ4. Конструкція шпиндельного вузла та його динамічна модель з розбиттям на ділянки показані на рис.1.



а) 3-D модель шпиндельного вузла;
 б) робоче креслення шпиндельного вузла;
 в) розрахункова динамічна модель шпиндельного вузла

Рис. 1. Вихідні моделі шпиндельного вузла багатощаблевого верстату моделі IP500ПМФ4

В опорах застосовані кулькові радіально-упорні підшипники, які зібрані за схемами «триплекс» і «дуплекс» в передній і задній опорах відповідно. В конусі шпинделя жорстко закріплена інструментальна оправка. В усіх проведених дослідженнях змінювались тільки параметри шпиндельного вузла d , a , l , а параметри інструментальної оправки залишались незмінними – довжина $l_o=150$ мм та діаметр $d_o=70$ мм.

Динамічний розрахунок шпиндельних вузлів здійснювався в програмі «DYNAMO-S». Програма складена за методом початкових параметрів у матричній формі для визначення переміщень і силових впливів в усіх перерізах динамічної моделі шпинделя та розрахунку його основних динамічних характеристик. Метод дозволяє звести розраху-

нок складної системи до ряду циклів алгебраїчних операцій, які багатократно повторюються і відповідають переходу від однієї ділянки системи до іншої, та успішно застосовувати комп'ютери [2]. Програма розроблена на кафедрі металорізальних верстатів Чернігівського державного технологічного університету [6].

Наведемо приклад динамічного розрахунку одного з варіантів обраної конструкції шпindelного вузла для шпindelя з діаметром у передній опорі $d = 100$ мм та міжопорною відстанню $l = 400$ мм (при розмірі консольної частини шпindelя $a = 100$ мм).

Початковими даними для розрахунку є:

- побудована параметрична 3D-модель шпindelного вузла з оправкою;
- розрахункова динамічна модель шпindelя;
- обчислені вихідні дані по кожному перерізу і кожній ділянці роторної системи;
- номер перерізу з прикладеною радіальною силою (на кінці оправки);
- розрахунковий частотний діапазон для обчислення динамічних характеристик.

Метод розрахунку передбачає розбиття динамічної моделі на ділянки за допомогою перерізів, яке здійснюється з урахуванням таких факторів: зміна діаметра вала, зосереджена (ножова) опора (наприклад, підшипник, що має жорсткість і демпфірування), зосереджений вантаж з масою і моментом інерції, жорстко закріплений безпосередньо на шпindelі (наприклад, зубчасте колесо), підвісний вантаж з масою і моментом інерції та інші впливові фактори.

На наступному етапі розрахунку визначалися параметри, які характеризують окремі ділянки динамічної моделі. До них зокрема відносяться:

- довжина ділянки, l_i ;
- зосереджена маса, M_i ;
- розподілена маса, m_i ;
- жорсткість при згині EI_i , де E – модуль Юнга, I_i – момент інерції i -го перерізу;
- розподілена жорсткість в підшипнику;
- коефіцієнт демпфірування в підшипнику.

Після формування файлу з початковими даними і запуску програми автоматично формується файл результатів, в якому для різних частот програма видає координати для побудови частотних характеристик шпindelного вузла (в полярній системі координат).

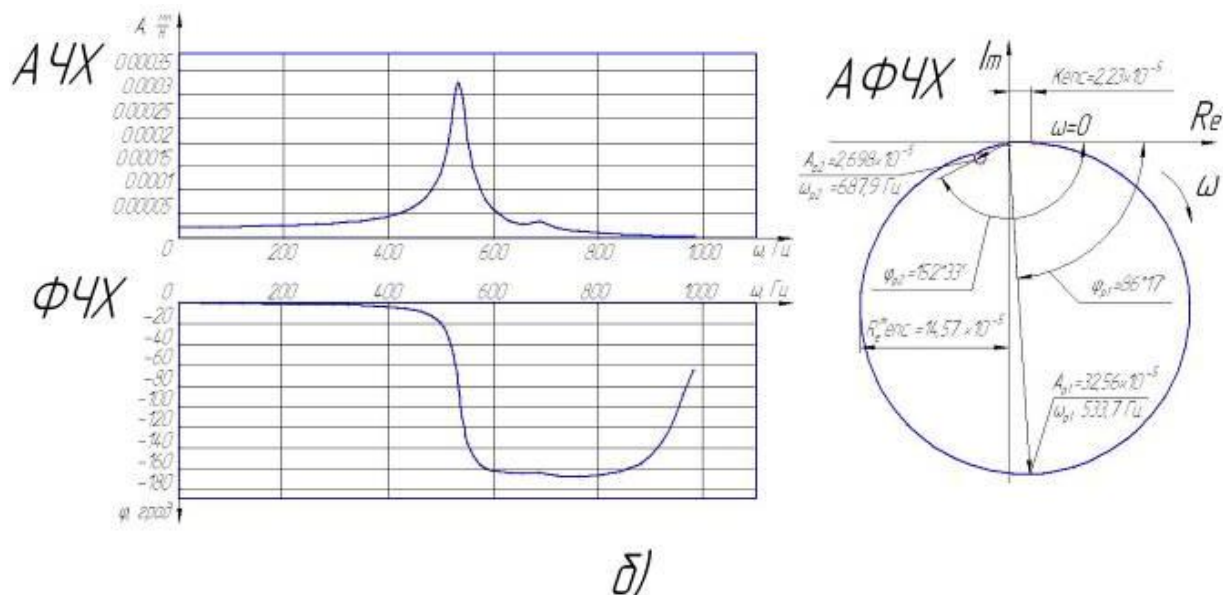
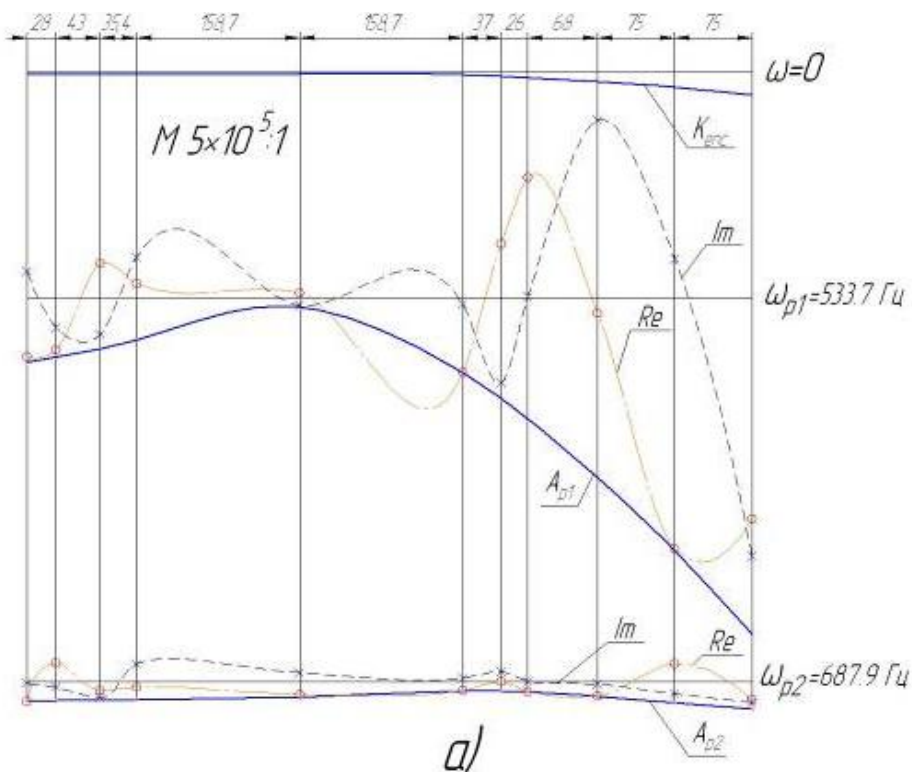
В програмі розраховуються динамічні характеристики у формі амплітудно-частотних (АЧХ), фазово-частотних (ФЧХ), амплітудно-фазово-частотних (АФЧХ) та інших характеристик, а також форми коливань шпindelя (видаються амплітуди і фази для кожного з перерізів). Приклад побудованих характеристик приведений на рисунку 2. Розрахунок дозволяє визначити основні параметри АФЧХ в зоні різання (перетин 11), зокрема, статичну податливість K_{enc} (рис. 3) та резонансні частоти ω_{p1} , ω_{p2} і амплітуди A_{p1} , A_{p2} шпindelного вузла (для даної схеми – дві). Першою резонансною частотою є 533,7 Гц (рис. 4), другою – 687,9 Гц (рис. 5).

На першому етапі дослідження виконувались розрахунки динамічних характеристик шпindelного вузла при варіюванні міжопорної відстані l (300, 350, 400, 450 та 500 мм), а також діаметра в передній опорі шпindelя d (60, 100, 140, 180 та 220 мм). При цьому діаметр між опорами приймався рівним d , а в задній опорі – на 10-20 мм менше (параметр $a = 100$ мм не змінювався). В результаті було проведено серію розрахункових експериментів і визначені основні параметри динамічних характеристик (АФЧХ). На рисунку 6 показані 3D-графіки залежностей основних параметрів АФЧХ (K_{enc} , ω_{p1} , ω_{p2} , A_{p1} , A_{p2}) від міжопорної відстані та діаметра в передній опорі шпindelя.

Проведемо аналіз отриманих результатів.

На графіку статичної податливості (рис. 6а) видно, що K_{enc} більше залежить від діаметра в передній опорі. Зі збільшенням діаметра до розміру 100 мм спостерігається стрімке зме-

ншення статичної податливості, бо шпиндельний вал стає більш жорстким і тому він менше піддається прогину від статичного навантаження. Але потім зменшення K_{enc} уповільнюється, з чого можна зробити висновок, що подальше збільшення діаметра валу меншою мірою впливає на його на податливість, деформація більше залежить від деформації підшипників. Також простежується вплив і міжопорної відстані, а саме зі зменшенням якої статична податливість знижується. Це пояснює сучасну тенденцію до скорочення шпиндельних валів тим, що зі зменшенням міжопорної відстані вал стає жорсткішим на згин.



а) статичний прогин K_{enc} та форми коливань A_p на першому та другому резонансі;
 б) основні динамічні характеристики ($AЧХ$, $ФЧХ$, $АФЧХ$) конструкції

Рис.2. Динамічні характеристики роторної системи шпиндельного вузла з інструментальною оправкою

П А Р А М Е Т Р Ї А Ф Ч Х

N	F	AM	PH	AM	PH
1	.0	.23552E-05	.00000E+00	.23613E-05	.00000E+00
		.23707E-05	.00000E+00	.23748E-05	.00000E+00
		.16951E-05	.00000E+00	.23115E-05	.00000E+00
		.39848E-05	.00000E+00	.53058E-05	.00000E+00
		.90920E-05	.00000E+00	.14860E-04	.00000E+00
		.22332E-04	.00000E+00		

Рис.3. Статична податливість шпиндельного вузла

58	: 533.7	.62441E-04	-.26747E+03	.57075E-04	-.26653E+03
		.48902E-04	-.26469E+03	.42278E-04	-.26266E+03
		.84706E-05	-.20825E+03	.71636E-04	-.91034E+02
		.97717E-04	-.88968E+02	.11775E-03	-.87959E+02
		.17363E-03	-.86307E+02	.24573E-03	-.84989E+02
		.32564E-03	-.83972E+02		
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			1
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			2
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			3
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			4
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			9
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			10
W=	.5337E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			11

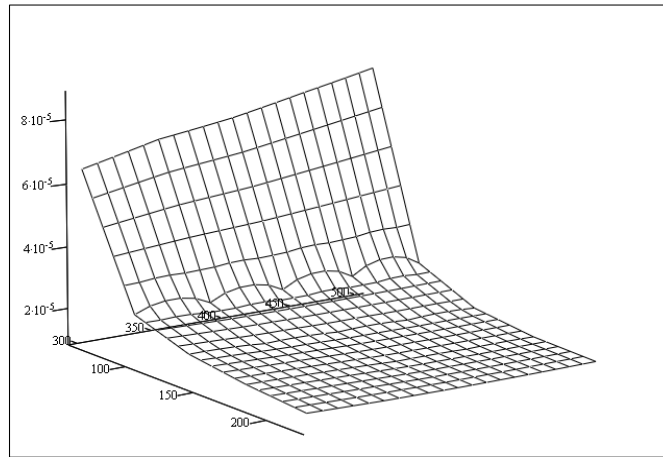
Рис. 4. Перша резонансна частота для шпиндельного вузла 533,7 Гц

89	: 687.9	.19371E-04	-.31722E+03	.18857E-04	-.31445E+03
		.18177E-04	-.30992E+03	.17750E-04	-.30597E+03
		.15163E-04	-.28647E+03	.94203E-05	-.23946E+03
		.94271E-05	-.21832E+03	.10203E-04	-.20422E+03
		.14416E-04	-.17889E+03	.20584E-04	-.16396E+03
		.26985E-04	-.15480E+03		
W=	.6879E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			2
W=	.6879E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			3
W=	.6879E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			4
W=	.6879E+03	-РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА КООРДИНАТЫ			11

Рис.5. Друга резонансна частота для шпиндельного вузла 687,9 Гц

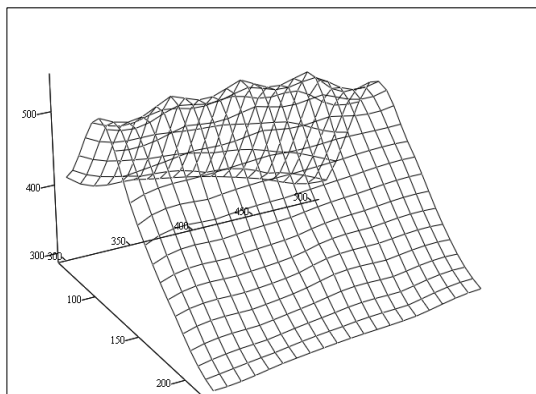
Проте, з іншого боку, для більших діаметрів зростає роль маси шпинделя, що призводить до зміни власних частот коливань системи (рис. 6-б). Так, до діаметра 100мм підвищення резонансної частоти (до 450-500 Гц) є наслідком збільшення діаметра в передній опорі, підвищення жорсткості вала на згин і збільшення жорсткості самої опори. Але з подальшим збільшенням діаметра передньої опори маса і жорсткість шпинделя суттєво збільшується, а жорсткість опори значно менше впливає на частоту, тому вона різко зменшується (до 300 Гц при 200мм). При другому резонансі конструкція веде себе подібно, але пік резонансної частоти знаходиться при діаметрі 180мм.

Щодо міжопорної відстані, то вона теж впливає на резонансну частоту. Для діаметра 60мм зі збільшенням міжопорної відстані резонансні частоти постійно знижуються. Це говорить про те, що оптимальна міжопорна відстань є меншою за 300мм. Для діаметра 100мм знайдено оптимум міжопорної відстані – 400мм. Для інших значень діаметрів зі збільшенням міжопорної відстані їх резонансна амплітуда постійно збільшується. Це говорить про те, що оптимальне значення міжопорної відстані лежить вище обраного діапазону. Резонансні амплітуди (рис. 6-в) теж залежать від діаметра передньої опори та міжопорної відстані, а саме зі збільшенням діаметра та зі зменшенням відстані між опорами амплітуда зменшується, бо шпиндельний вал стає жорсткішим, а також відбувається підвищення жорсткості в опорах. Лише для другого резонансу при діаметрі 180мм спостерігається стрибок амплітуди, що пояснюється другою формою коливань шпинделя.

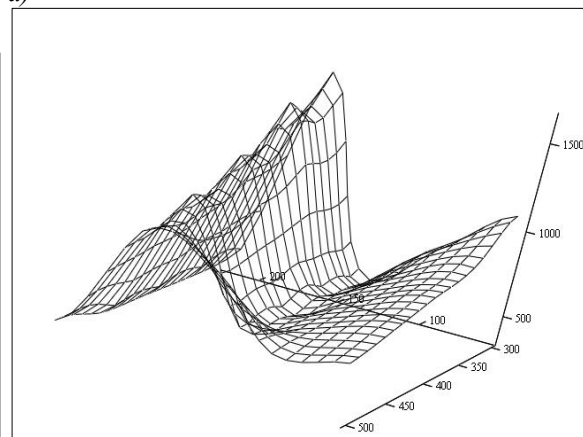


(d, I, Кенс)

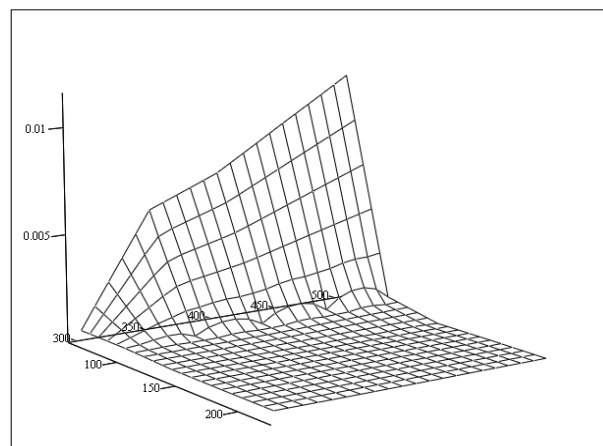
a)



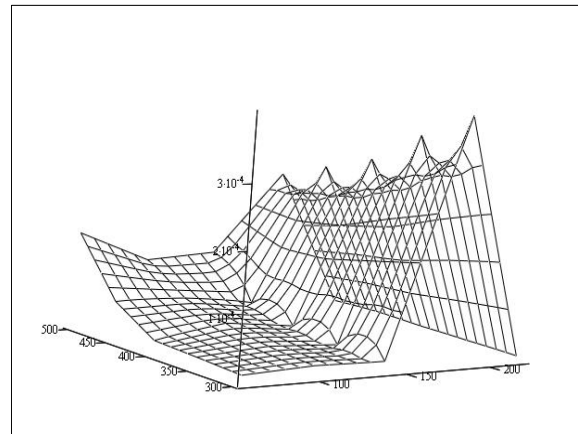
d, I, е1



d, I, е2
 б)



(d, I, A1)



(d, l, A₂)

в)

- а) статична податливість K_{enc} ;
 б) резонансна частота ω_r (першого та другого резонансу, відповідно);
 в) резонансна амплітуда A_r (першого та другого резонансу, відповідно)

Рис.6. 3D-графіки залежності основних динамічних параметрів від діаметра передньої опори та міжопорної відстані шпиндельних вузлів

Для уточнення результатів виконаних розрахунків були проведені додаткові розрахункові експерименти ще для двох діаметрів 80мм та 120мм. При цьому загальна картина впливу діаметра передньої опори та міжопорної відстані не змінилась, але були знайдені оптимальні значення міжопорних відстаней для кожного з діаметрів.

Після проведення основних досліджень виникла необхідність у наступних додаткових дослідженнях.

1. З метою уточнення залежностей для діаметра 100мм міжопорна відстань змінювалась від 240мм до 500мм з інтервалом 20мм.
2. Для знаходження оптимумів уведений два додаткові діаметри 80мм та 120мм і розширено діапазон міжопорних відстаней від 100мм до 900мм.

Додаткові аналогічні розрахунки були проведені для усіх змінних параметрів шпиндельних вузлів. Отримані результати зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати розрахункових експериментів

№ п/п	d, мм	l, мм	K _{enc} , мм/Н	Перший резонанс		
				ω_{p1} , Гц	A _{p1} , мм/Н	Φ_{p1}
1	2	3	4	5	6	7
1	60	100	.72242E-04	384.3	.18322E-02	-.90155E+02
2	60	150	.58743E-04	429.1	.17089E-02	-.89447E+02
3	60	200	.57644E-04	437.0	.21168E-02	-.86968E+02
4	60	250	.60473E-04	429.0	.28584E-02	-.90029E+02
5	60	300	.64910E-04	413.2	.39360E-02	-.89168E+02
6	60	350	.71319E-04	388.5	.57720E-02	-.90817E+02
7	60	400	.75399E-04	371.4	.71489E-02	-.88408E+02
8	60	450	.80966E-04	346.9	.92064E-02	-.90357E+02
9	60	500	.86572E-04	320.4	.11251E-01	-.87119E+02
10	80	150	.40203E-04	467.1	.77629E-03	-.88961E+02
11	80	200	.35182E-04	502.2	.70326E-03	-.86697E+02
12	80	250	.33910E-04	517.1	.74687E-03	-.87419E+02
13	80	300	.34242E-04	518.9	.87475E-03	-.86977E+02
14	80	350	.35365E-04	511.5	.11135E-02	-.88777E+02
15	80	400	.36917E-04	494.6	.15396E-02	-.90751E+02

Продовження таблиці 1

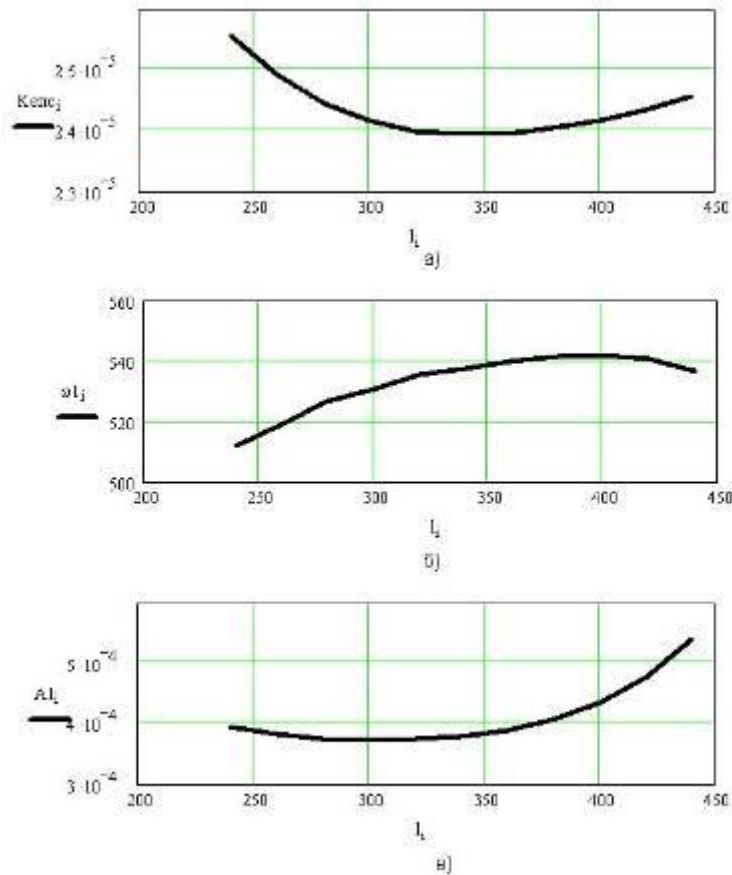
1	2	3	4	5	6	7
16	80	450	.38715E-04	466.3	.22211E-02	-.86650E+02
17	80	500	.40658E-04	428.8	.29803E-02	-.88487E+02
18	100	240	.25568E-04	511.7	.39486E-03	-.88321E+02
19	100	260	.24901E-04	519.0	.38227E-03	-.84795E+02
20	100	280	.24448E-04	526.1	.37490E-03	-.86891E+02
21	100	300	.24159E-04	530.5	.37202E-03	-.84142E+02
22	100	320	.23996E-04	535.2	.37341E-03	-.86575E+02
23	100	340	.23933E-04	537.5	.37904E-03	-.83819E+02
24	100	360	.23950E-04	540.0	.38989E-03	-.85828E+02
25	100	380	.24032E-04	541.5	.40707E-03	-.87332E+02
26	100	400	.24167E-04	541.7	.43395E-03	-.88219E+02
27	100	420	.24344E-04	540.4	.47579E-03	-.88706E+02
28	100	440	.24558E-04	536.1	.53886E-03	-.85105E+02
29	100	460	.24801E-04	529.3	.61970E-03	-.86002E+02
30	100	480	.25070E-04	518.7	.67782E-03	-.93059E+02
31	100	500	.25360E-04	502.2	.69127E-03	-.88384E+02
32	120	300	.19906E-04	487.8	.26401E-03	-.82732E+02
33	120	350	.19096E-04	499.3	.23872E-03	-.82032E+02
34	120	400	.18757E-04	506.9	.22179E-03	-.82400E+02
35	120	450	.18706E-04	510.0	.20858E-03	-.74588E+02
36	120	500	.18842E-04	518.4	.27011E-03	-.85720E+02
37	120	550	.19102E-04	476.4	.11807E-03	-.34802E+02
38	120	600	.19450E-04	434.3	.10700E-03	-.55914E+02
39	120	650	.19859E-04	393.3	.15120E-03	-.57872E+02
40	120	700	.20313E-04	358.0	.21276E-03	-.84075E+02
41	120	750	.20800E-04	324.8	.30197E-03	-.92795E+02
42	140	300	.17808E-04	430.6	.24506E-03	-.87055E+02
43	140	350	.16720E-04	443.2	.21273E-03	-.87181E+02
44	140	400	.16108E-04	450.6	.19007E-03	-.82226E+02
45	140	450	.15790E-04	455.3	.16921E-03	-.78983E+02
46	140	500	.15664E-04	458.6	.13858E-03	-.76025E+02
47	140	550	.15669E-04	446.6	.97268E-04	-.30393E+02
48	140	600	.15764E-04	425.1	.63931E-04	-.13602E+02
49	140	650	.15926E-04	395.2	.50696E-04	-.18308E+02
50	140	700	.16136E-04	370.1	.51033E-04	-.47020E+02
51	140	750	.16382E-04	342.0	.73432E-04	-.63356E+02
52	180	300	.14879E-04	350.1	.22589E-03	-.86074E+02
53	180	350	.14059E-04	358.2	.20115E-03	-.85662E+02
54	180	400	.12878E-04	372.0	.16475E-03	-.87270E+02
60	180	450	.12362E-04	379.3	.14692E-03	-.90131E+02
61	180	500	.12023E-04	383.1	.13367E-03	-.83988E+02
62	180	550	.11807E-04	385.7	.11436E-03	-.77644E+02
63	180	600	.11679E-04	389.4	.11609E-03	-.79309E+02
64	180	650	.11614E-04	391.4	.11391E-03	-.82289E+02
65	180	700	.11596E-04	392.8	.10997E-03	-.84900E+02
66	180	750	.11615E-04	331.0	.25697E-04	-.66107E+01
67	180	800	.11662E-04	319.7	.22386E-04	-.11834E+02
68	180	850	.11731E-04	295.7	.22935E-04	-.66660E+01
69	220	300	.12952E-04	293.0	.21602E-03	-.90466E+02
70	220	350	.11833E-04	304.7	.17706E-03	-.90434E+02
71	220	400	.11073E-04	314.0	.15036E-03	-.91940E+02

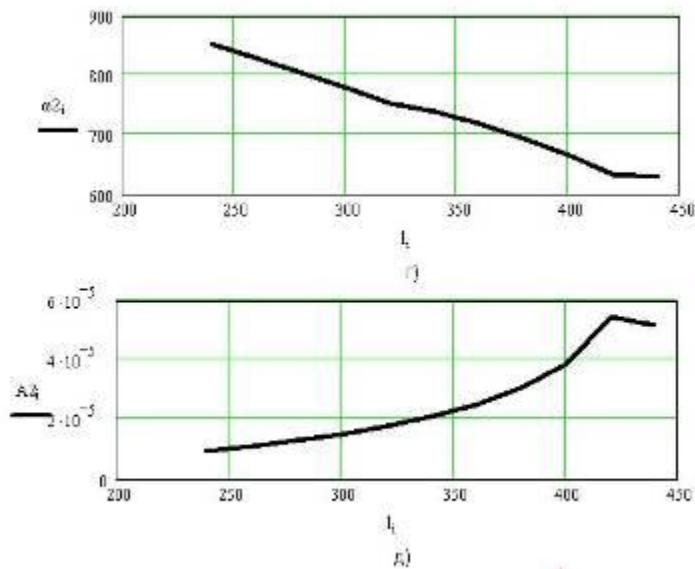
Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
72	220	450	.10545E-04	319.9	.13313E-03	-.80973E+02
73	220	500	.10172E-04	334.3	.10479E-03	-.86496E+02
74	220	550	.99083E-05	335.3	.88611E-04	-.86330E+02
75	220	600	.97220E-05	332.6	.74029E-04	-.70887E+02
77	220	650	.95929E-05	331.2	.55380E-04	-.77255E+02
78	220	700	.95068E-05	325.0	.41264E-04	-.60832E+02
79	220	750	.94536E-05	315.4	.30947E-04	-.36900E+02
80	220	800	.94263E-05	309.3	.20158E-04	-.30059E+02
81	220	850	.94193E-05	291.5	.18668E-04	-.77529E+01
82	220	900	.94286E-05	280.3	.16330E-04	-.36079E+01

За результатами першого додаткового дослідження побудовані графіки залежностей основних динамічних параметрів від міжопорної відстані шпиндельного вузла (рис. 7).

На рисунку 7а зображена залежність статичної податливості від міжопорної відстані, величина якої зі збільшенням міжопорної відстані спочатку зменшується до мінімуму, а потім зростає. Для неї було знайдено оптимальне значення – 340мм. Аналогічно веде себе і перша резонансна амплітуда (рис. 7в), оптимум для якої складає 300мм. Перша резонансна частота (рис. 7б) – навпаки, спочатку зростає до максимуму (при відстані 400мм), а потім падає. Для другого резонансу оптимумів не виявлено. Друга резонансна частота (рис. 7г) постійно падає, а амплітуда (рис. 7д) – зростає.

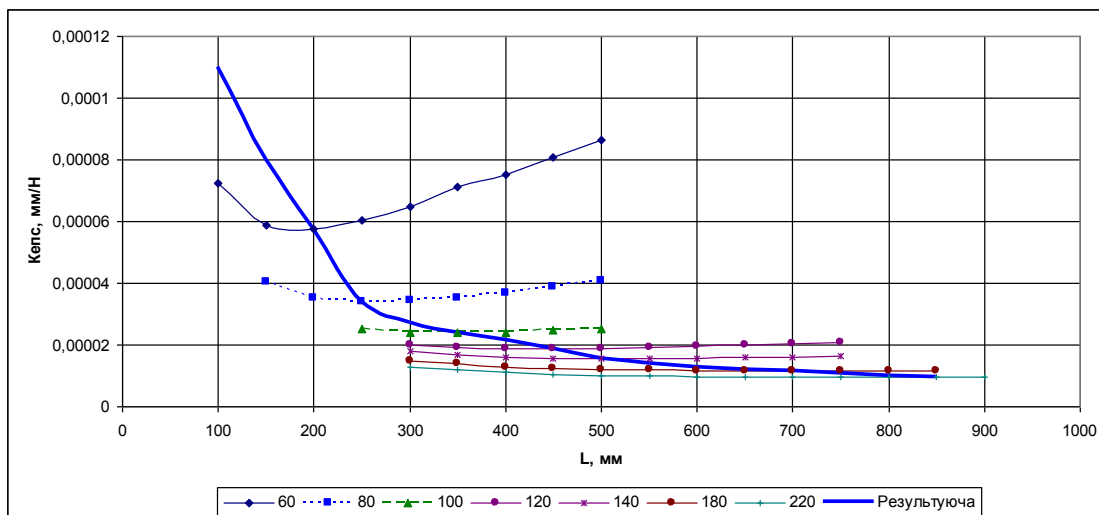




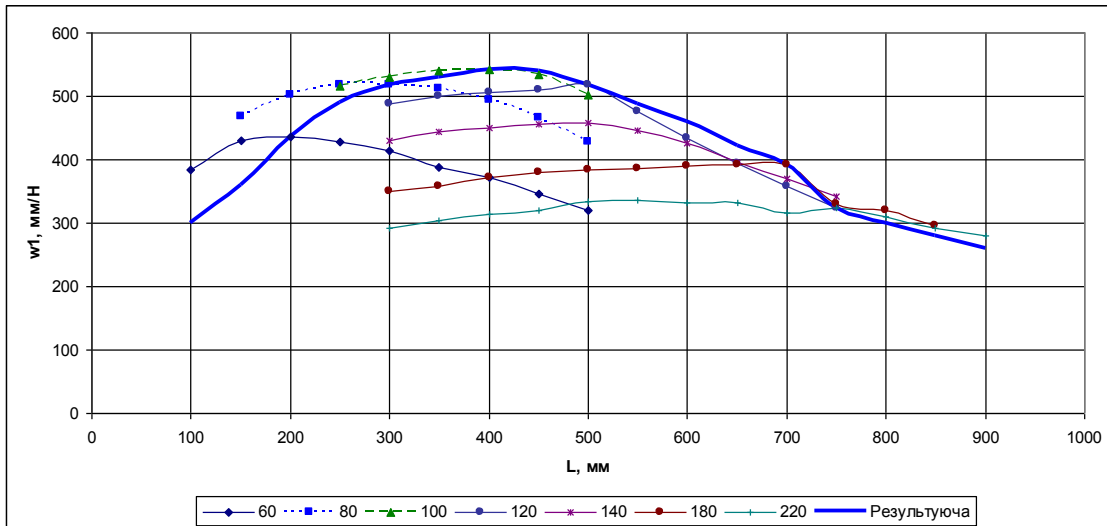
- a) статична податливість;
- б) перша резонансна частота;
- в) перша резонансна амплітуда;
- г) друга резонансна частота;
- д) друга резонансна амплітуда

Рис.7. Графіки залежності основних параметрів АФЧХ від міжопорної відстані шпиндельного вузла (для діаметра 100мм в передній опорі)

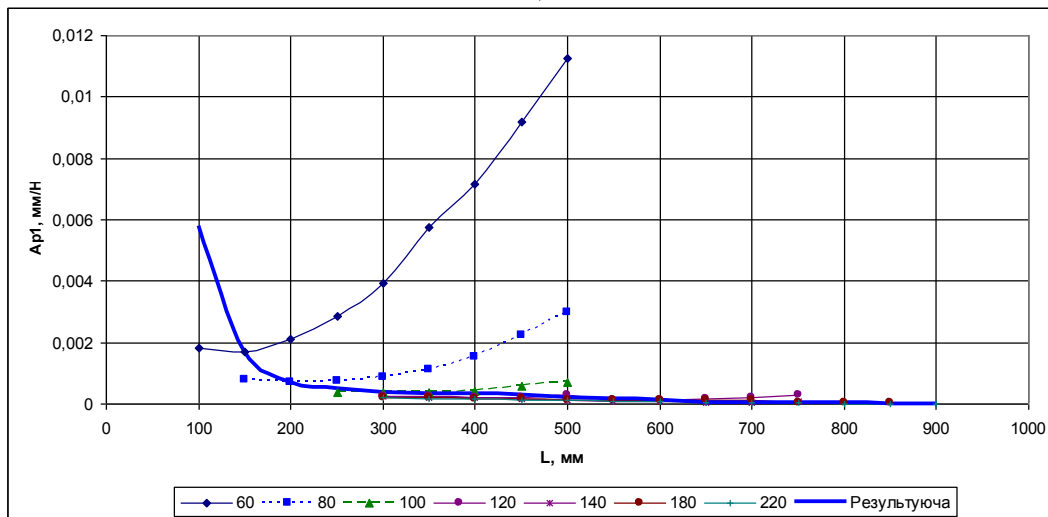
За результатами другого додаткового дослідження побудовані графіки залежності основних параметрів шпиндельних вузлів від міжопорної відстані для різних діаметрів передньої опори – 60, 80, 100, 120, 140, 180, 220мм (рис. 8).



a)



б)



в)

- а) статична податливість K_{enc} ;
- б) перша резонансна частота ω_{p1} ;
- в) перша резонансна амплітуда A_{p1}

Рис.8. Графіки залежності основних параметрів шпиндельних вузлів від міжопорної відстані (для різних діаметрів передньої опори – 60, 80, 100, 120, 140, 180, 220 мм)

На рисунку 8а зображений результуючий графік залежності оптимального значення статичної податливості для різних діаметрів від міжопорної відстані. З графіка видно, що зі збільшенням діаметра передньої опори мінімальне значення K_{enc} (статичний оптимум) постійно зменшується і при цьому зміщується в бік збільшення міжопорної відстані.

Подібне явище спостерігається і для першої резонансної амплітуди (рис. 8в), але при інших значеннях міжопорних відстаней.

Щодо першої резонансної частоти (рис. 8б), то її оптимальна (максимальна) величина для різних діаметрів буде різною: до 100мм – зростає, а потім – зменшується.

З графіків видно, що для шпиндельних вузлів великого діаметру (більше 100мм) оптимальні значення K_{enc} і амплітуди змінюються менше, а оптимальна резонансна частота падає. Це можна пояснити тим, що шпиндельний вал стає більш жорстким і масивнішим.

Висновки

Результати приведених досліджень дозволяють зробити важливий висновок про те, що, крім статичних оптимумів основних компоновочних параметрів шпиндельного ву-

зла, існують аналогічні динамічні. При цьому вони не співпадають за значеннями параметрів, хоча і знаходяться поряд (зміщуються як в менший, так і в більший боки від статичних). При цьому для малих діаметрів шпинделів (менш жорстких) точки розташування оптимумів (практично з усіх параметрів) змінюються більш динамічно.

Таке зміщення оптимумів необхідно враховувати при параметричній оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів. Особливо це стосується шпиндельних вузлів спеціальних і спеціалізованих верстатів, в яких параметри динамічної системи практично не змінюються протягом усього життєвого циклу роботи верстата.

Отже, для досягнення найкращого результату конструювання шпиндельного вузла потрібно враховувати отримані залежності і забезпечити оптимальні співвідношення між діаметром передньої опори та міжопорною відстанню при заданих параметрах довжини консолі шпинделя.

Бажані раціональні параметри конструкції шпиндельних вузлів (оптимуми компонок) можна знайти за допомогою розробки спеціалізованої САПР, в якій передбачена багатокритеріальна параметрична оптимізація вузлів як за статичними, так і за динамічними та інших показниками і характеристиками.

Список використаних джерел

1. Данильченко Ю.М. Прецизійні шпиндельні вузли на опорах кочення / Данильченко Ю.М., Кузнецов Ю.М. – Тернопіль: Економічна думка, 2003. – 342с.
2. Ивович В.А. Переходные матрицы в динамике упругих систем: справочник / Ивович В.А. 2-е издание. – М.: Машиностроение, 1981 – 183с.
3. Кудинов В.А. Динамика станков / Кудинов В.А. – М.: Машиностроение, 1967 – 360с.
4. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / Пуш А.В. – М.: Машиностроение, 1992. – 288с.
5. Чернянский П.М. Оптимальное проектирование шпиндельных узлов с увеличением числа подшипников в опорах / Чернянский П.М., Шабанов В.В. // Технология металлов. – М.: ООО "Наука и технологии", 2007. – № 5. – С. 38-42.
6. Чуприна В.М. Динамічний розрахунок шпиндельних вузлів у САПР металорізальних верстатів / Чуприна В.М., Липлянський Ю.С. // Вісник ЧДТУ. Серія "Технічні науки". – Чернігів, 2001. – № 13. – С. 44-51.
7. Чуприна В.М. Порівняльний розрахунок динамічних характеристик шпиндельного вузла верстату 16К20Ф3 в САПР / Чуприна В.М., Дмитренко М.А., Лоскутов С.В. // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 37. – С. 105-116.