УДК 621.01(06)

В. А. Витренко, д-р техн. наук, проф., **Г. В. Сыровой**, ст. преп.,
Е. В. Синдеева, ассистент
Луганский национальный университет имени Владимира Даля
Тел.: +38(095)0703018; E-mail: siig@i.ua

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МЕТОДОМ ЛП-ПОИСКА

В статье приведен пример решения задачи оптимизации одного из вариантов шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4 на основе ЛП-поиска. Расчет проводится с помощью математического программного пакета Mathcad15. Представлены конструктивная и расчетная схемы шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4. В статье в качестве оптимизируемых переменных были приняты основные конструктивные параметры шпиндельного узла (диаметр шпинделя, межопорное расстояние, расстояние между подшипниками в передней и задней опорах). Показана как зависит номер варианта и расстояние между спаренными подшипниками в передней и задней опорах шпиндельного узла.

Ключевые слова: *оптимизация, ЛП-поиск, шпиндельный узел, критерий, таблица испытаний.*

V. A. Vitrenko, G. V. Sirovoj, E. V. Sindeeva

EXAMPLE OF THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF SHPINDELNY KNOT BY METHOD OF LP-SEARCH

The article provides an example solution of optimization problem one of the variants of spindle unit of the machining center model СФ68ВФ4 based on LP-search. The calculation is carried out using a mathematical software package Mathcad15. Constructive and settlement schemes of shpindelny knot of the processing center of the SF68VF4 model are submitted. In article as the optimized variables the key design data of shpindelny knot have been accepted (diameter of a spindle, interbasic distance, distance between bearings in forward and back support). It is shown as number of option and distance between the coupled bearings in forward and back support of shpindelny knot depends.

Keywords*: optimization, LP-search, shpindelny knot, criterion, table of tests.*

1. Введение

Типовые конструкции шпиндельных узлов в настоящее время достаточно хорошо отработаны и унифицированы. Поэтому на первом этапе проектирования расчеты точностных показателей этих узлов носят сравнительный характер и выполняются с целью выбора их наилучшей схемы, а также типоразмеров опор применительно к типу оборудования и заданному режиму обработки. Следующий этап включает расчетную оценку рабочих характеристик и выполнение оптимизационных расчетов, в процессе которых производится обоснование конструктивных параметров выбранного варианта шпиндельного узла (ШУ).

В работе [1] рассмотрена оптимизация шпиндельного узла многоцелевого станка. Варьируемым параметром являлся диаметр шпинделя на переднем конце (базовое значение D=86 мм), а также типы конструкции переднего и заднего подшипника.

В результате проведённого расчёта получено несколько вариантов шпиндельного узла, превосходящих по своим характеристикам базовый. Каждый из эффективных вариантов превосходит по своим параметрам базовый вариант ШУ. Этот пример достаточно наглядно демонстрирует эффективность метода многокритериальной

оптимизации, а также показывает, что оптимизация может производиться не только по количественным характеристикам, но и по качественным.

Универсальным методом, позволяющим просмотреть всё гиперпространство параметров независимо от его свойств, является метод ЛП-поиска [2]. Однако введение ограничений на фазовые координаты проектируемой модели и её отдельные параметры далеко не во всех случаях может быть увязано в условиях, когда речь идёт о задачах оптимального синтеза.

В работе [3] рассмотрена оптимизация шпиндельного узла внутришлифовального станка методом случайного поиска (ЛП-поиска), которая позволила исследовать комплекс частных критериев и выбрать оптимальный вариант решения, но окончательное решение принимает конструктор.

Современные программные расчетные системы позволяют проводить оптимизацию станочных комплексов и станков по большим параметрам, чем это выполнялось методом ЛП-поиска.

Поэтому решение задачи по оптимизации шпиндельного узла обрабатывающего центра выполним методом ЛП-поиска на основе использования пакета прикладных программ КОМПАС-3DV16 и Mathcad15.

2. Основное содержание и результаты работы

Сложность задачи многокритериальной оптимизации (МКО) напрямую зависит от количества учитываемых критериев и числа оптимизируемых параметров (размерность задачи). Для многокритериальной оптимизации эффективное применение находит метод ЛП-поиск [4]. Достоинства данного метода заключаются в том, что математический аппарат метода ЛП-поиска обеспечивает формирование векторов X_1, X_2, Xn в N точках, равномерно расположенных в пространстве независимых параметров. Другим важным достоинством этого метода является выработанная удобная форма анализа комплекса частных критериев в виде так называемой таблицы испытаний.

Таким образом, общее число испытаний равно N и для каждого из них вычисляют значения всех частных критериев. Каждому критерию в таблице испытаний отведена одна строка, в которой значения этого критерия располагают в порядке возрастания с указанием номера испытаний.

Целью данной работы является решение задачи оптимизации конструкции шпиндельного узла методом ЛП-поиска на основе использования пакета прикладных программ.

Объектом оптимизационной задачи является шпиндельный узел обрабатывающего центра станка СФ68ВФ4, и представляет собой 3-D модель двухопорной конструкции (рис. 1).

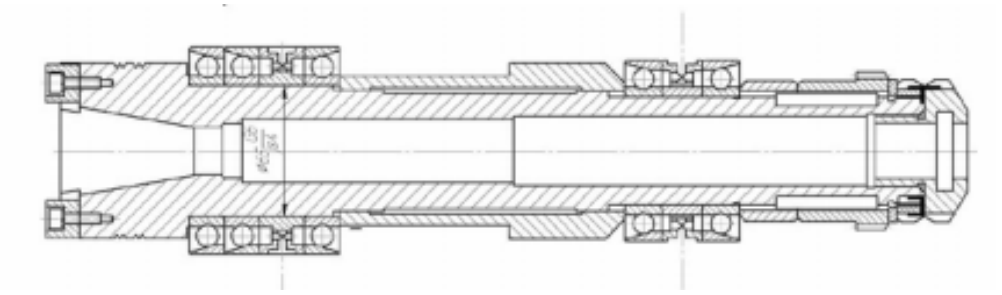

Рисунок 1 - Шпиндельный узел

Модель построена в системе КОМПАС-3D V-16, смонтирована на двух опорах качения и имеет следующие конструктивные особенности:

в передней опоре шпинделя установлены три радиально-упорных подшипника 46113 (65х100х18 мм, C_0=24500);

в задней опоре установлены сдвоенные радиально-упорные шарикоподшипники 46112 (60х95х18 мм, C_0=24500), смонтированные по схеме " тандем-О ".

Предварительный натяг реализован разновысотными прокладочными кольцами с возможностью подгонки и регулирования по величине. Величина предварительного натяга P_H=1150 Н.

Конструктивная схема шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4, используемая для расчетов представлена на рис. 2.

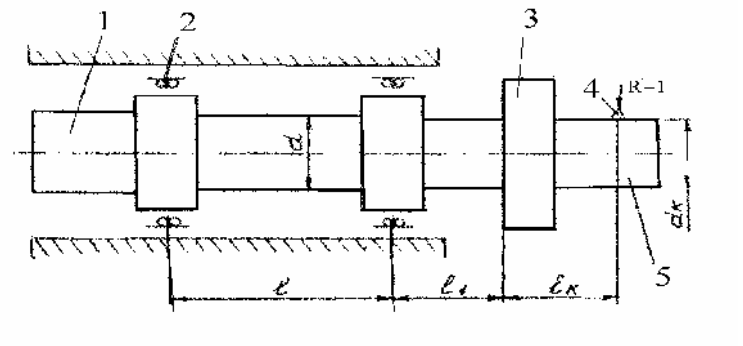

Рисунок 2 - Конструктивная схема ШУ: 1 – шпиндель; 2 – опора на сдвоенных подшипниках качения с предварительным натягом; 3 – фланец; 4 – режущий инструмент; 5 – консоль (включающая фланец)

Для уменьшения трудоемкости расчета решения данной задачи оптимизации заменяем сдвоенные подшипники одной опорой, переходя к двухопорной расчетной схеме [5].

Данную конструктивную схему рассмотрим как статически неопределимую балку на четырех опорах (подшипник-опора), которые в общем случае обладают линейными A и угловыми a податливостями (рис. 3), где

$R_n, R_з, m_n, m_з$ – опорные реакции и моменты в передней и задней опорах;

$A_n, a_n, A_з, a_з$ – линейные и угловые податливости передней и задней опор;

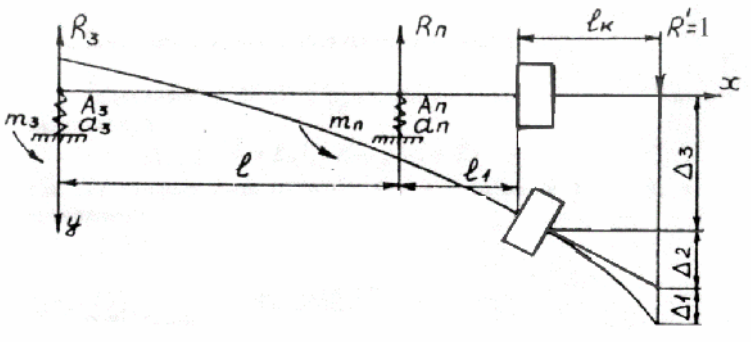

Рисунок 3 - Расчетная схема шпиндельного узла:

R' – единичная сила, приложенная в месте резания;

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – перемещения, вызванные соответственно воздействием единичной силы на консоль, податливостью шпинделя и опор.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Для решения задачи по оптимизации шпиндельного узла принимаем комплекс частных критериев, используемых при оценке качества работы шпиндельного узла [4]:

1. $y_1(x)$ – упругое радиальное перемещение от единичной силы переднего конца шпинделя, обусловленное податливостью шпинделя и его опор;

2. $y_2(x)$ – максимальный радиус-векторы амплитудной фазо-частотной характеристики (АФЧХ) шпиндельного узла по возмущению от силы резания в радиально направлении на первой собственной частоте .

3. $y_3(x)$ – приведенная нагрузка на переднюю опору шпинделя от единичной силы на его переднем конце.

Базовому варианту шпиндельного узла присваиваем следующие значения составляющих векторов X_0:

диаметр шпинделя – $D_ш$=65 мм,

межопорное расстояние – l =148 мм,

длина консольной части шпинделя l_1=68 мм,

длина фланца $l_ф = 45$ мм,

диаметр фланца $d_ф = 92$ мм,

длина консольной части $l_k = 55$ мм,

расстояние между подшипниками в передней опоре $l_p = 3$ мм,

расстояние между подшипниками в задней опоре $l_з = 3$ мм.

В качестве оптимизируемых переменных принимаем основные конструктивные параметры шпиндельного узла (диаметр шпинделя, межопорное расстояние, расстояние между подшипниками в передней опоре и задней опоре) и накладываем ограничения на оптимизируемые переменные:

$$34 \le D_ш \le 120 \qquad 80 \le l \le 250$$
$$0 \le l_p \le 30 \quad \text{(мм)} \qquad 0 \le l_з \le 60 \quad \text{(мм)}$$

В качестве критериальных ограничений принимаем значения частных критериев базового варианта:

$$y_k(x) \le y_k(x_0), \quad k = 1,2,3.$$

Результаты расчетов, полученные на основе использования математического программного пакета Mathcad15, представлены в табл. 1. Каждая строка таблицы соответствует одному из частных критериев, в числителе указан номер i варианта шпиндельного узла (всего было просчитано N=1…128 вариантов), а в знаменателе – нормированное значение частного критерия, соответствующего данному варианту.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

Δ – упругое радиальное перемещение от единичной силы переднего конца шпинделя, обусловленное податливостью шпинделя и его опор

$R_{ПS}$ – приведенная нагрузка на переднюю опору шпинделя от единичной силы на его переднем конце.

A_s – максимальный радиус-векторы амплитудной фазо-частотной характеристики шпиндельного узла по возмущению от силы резания в радиально направлении на первой собственной частоте.

s – номер варианта шпиндельного узла.

Таблица 1. Таблица результатов расчета в программном пакете Mathcad15

$\Delta = 8.438 \times 10^{-6}$ ¶ Rп = 1.1957 ¶ $A = 8.8363 \times 10^{-5}$ ¶

Δs =

	1	2	3	4	5	6	7
1	87	47	127	79	31	55	103
2	1	1.0191	1.0216	1.0221	1.0262	1.0388	...

¶

Rпs =

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	112	56	25	110	76	42	37	127
2	1	1.0717	1.0778	1.0825	1.0843	1.0908	1.0923	...

¶

As =

	1	2	3	4	5	6	7
1	87	47	127	79	31	55	103
2	1	1.0191	1.0216	1.0221	1.0262	1.0388	...

¶

Расчеты показали, что сближение подшипников в передней опоре увеличивает ее жесткость, а увеличение l_3 повышает защемляющий эффект задней опоры, что в совокупности с увеличением диаметра межопорной части шпинделя улучшает значение критериев, по оценке качества работы шпиндельного узла.

На основании этого оптимальным решением по критериям y_1, y_2 и y_3, исходя из табл. 1, стали варианты N=25 и 110 для которых и зададим значения управляемых параметров (табл. 2).

Таблица 2. Значения управляемых параметров двух вариантов шпиндельного узла, мм

№ варианта	D_s	L_s	$L_{Пs}$	$L_{зs}$
25	90.0	489.0625	27.1875	20.625
110	75.0	486.3281	22.2656	22.9688

Зная значения управляемых параметров, проводим построение упруго деформационной модели шпиндельного узла обрабатывающего центра СФ68ВФ4 в программном комплексе КОМПАС-3DV16 с дальнейшим его анализом.

4. Заключение

1. Метод ЛП-поиска на основе использования прикладных расчетных систем позволяет выбрать оптимальный вариант решения задачи по оптимизации конструкции шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4.

2. При оптимизации конструкции шпиндельного узла были программно выбраны варианты N=25 и 110, где с увеличением номера варианта – уменьшается размер ℓp и увеличивается размер $\ell з$.

3. В результате проведённого расчёта были получены варианты конструкции шпиндельного узла, превосходящие по своим характеристикам базовый вариант.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горностаев, А. В. Использование качественных характеристик при многокритериальной оптимизации методом ЛП-поиска / А. В. Горностаев // Материалы международной конференции «Информационные средства и технологии», секция «Информатизация в МС». – Москва, 1999.

2. Соболь, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб пособие для вузов / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.

3. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных втузов / под ред. В. Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

4. Многокритериальные задачи принятия решений / под ред. В. В. Подиновского. – М.: Машиностроение, 1978. – 320 с.

5. Попов, В. И. Динамика станков / В. И. Попов, В. И. Локтев. – К.: Тэхника, 1975. - 136 с.

6. Егоров, О. Д. Эволюционный алгоритм многокритериальной оптимизации параметров механизмов мехатронных устройств и роботов / О. Д. Егоров, М. А. Буйнов // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2015. - № 3(34). – С. 93-97

7. Грязев, М. В. Оптимизация параметров и синтез закона управления методом ЛПτ – поиска и применение принципа динамического расширения-сжатия фазового пространства динамического объекта / М. В. Грязев, О. А. Кузнецова // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2014. - Вып.2. – С. 214-224.

8. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т., Т. 1. / Т. М. Авраамова, В. В. Бушуев, Л. Я. Гиловой и др.; под ред. В. В. Бушуева. – М.: Машиностроение, 2012. – 608 с.; ил.

9. Оптимизация и управление процессом резания: Учеб. пособие / О. С. Кроль, Г. Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140 с.

Поступила в редколлегию 03.02.2017 г.