

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Прокопенко В.А., Семенюк Н.А., Баранов М.А.*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** динамическое качество САР, виброустойчивость, гидростатический подшипник, критерий оценки.

**Аннотация.** Приводятся расчетные критерии оценки динамики гидростатических подшипников. Дано сравнение их возможностей применения. Отмечены средства повышения динамического качества САР за счет применения RC-коррекции.

## ON THE APPLICATION OF DYNAMIC QUALITY'S CRITERIA IN RESEARCHES OF MACHINE EQUIPMENT'S HYDROSTATIC BEARINGS

*Prokopenko V.A., Semenyuk N.A., Baranov M.A.*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg*

**Keywords:** dynamic quality of ACS, vibration resistance, hydrostatic bearing, evaluation criterion.

**Abstract.** The calculation criteria for estimating the dynamics of hydrostatic bearings are given. A comparison of their application possibilities is given. Means of increasing the dynamic quality of ACS due to the use of RC-correction are noted.

При разработке и модернизации гидростатических подшипников (ГСП) металлорежущего оборудования (МРО) первостепенное значение имеет оценка динамического качества (ДК) шпиндельных узлов.

При исследованиях за объект принят тяжелый серийный расточной модуль ЛР520ПМФ-4 с диаметром выдвигаемого шпинделя  $D=160$  мм. Выполнена оценка ДК ГСП с использованием следующих критериев: запас устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$ , показатель колебательности  $M$ , логарифмический декремент колебаний  $\lambda$ .

Установлено, что в исходном состоянии ГСП имеет низкое ДК ( $\Delta\varphi=7^\circ$ ). Для его повышения рассмотрено введение в ГСП динамической коррекции в виде RC-цепи (с гидросопротивлением  $R_A$  и гидроемкостью  $C_A$ ). Для определения значений  $R_A$  и  $C_A$  расчет  $\Delta\varphi$  [1] производился по частотным характеристикам [2] системы автоматического регулирования (САР) через передаточные функции ( $W_p$ ) [3]. Для оценки ДК  $\Delta\varphi$  должен обеспечиваться на уровне не менее  $55^\circ$  [4]. При расчете  $M$  его значение при высоком ДК должно составлять 1.1-1.3 [5] и определяться по асимптотической ЛАЧХ как [6]:

$$M = \frac{T_{\omega_{cp}}}{T_{\omega_{cp}} - 1},$$

где  $T$  – постоянная времени, соответствующая наклону ЛАЧХ – 20 дБ/дек до  $\omega_{cp}$ ,  $\omega_{cp}$  – значение частоты среза.

В случае введения в САР РС-цепи колебательность САР может быть достаточно низкой. В этом случае определение  $\lambda$  затруднено и был использован метод построения АЧХ [7] (например, в пакете МВТУ) после чего по расчетной амплитуде  $A = A_{\max} / \sqrt{2}$  (где  $A_{\max}$  – значение амплитудного пика на АЧХ) производится расчет  $\lambda = \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_{\max}}$ , где  $\omega_2$  и  $\omega_1$  – частоты на АЧХ по уровню

$$A = A_{\max} / \sqrt{2}, \omega_{\max} - \text{частота, соответствующая } A_{\max}.$$

В таблице 1 приведены результаты расчета показателей ДК для различных вариантов исполнения коррекции.

Из анализа полученных результатов следует:

- при отсутствии коррекции (вариант 0) в исходном состоянии ГСП имеет низкое демпфирование;

- при вариантах коррекции 1-3 рассмотренная РС-цепь с емкостью  $C_A=21 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$  (в виде стандартного стального сильфона 18x10x0.25 ГОСТ 21482-76) обеспечивает у САР близкие значения  $\Delta\phi$  (высокие значения ДК), однако из-за отличия соответствующих значений расхождения в динамике все-таки имеют место;

- при ближайшей меньшей стандартной величине  $C_A=5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$  значение  $\Delta\phi$  существенно ниже и находится в области низкого ДК;

- по критерию М в варианте 3 обеспечивается наилучшее по сравнению с вариантами 1 и 2 общее ДК;

- по критерию  $\lambda$  для варианта 3 также ДК наилучшее.

Табл. 1. Показатели ДК для различных вариантов коррекции

Номер варианта		0	1	2	3	4	5
Параметры коррекции	$C_A, *10^{-14} \text{ м}^3 / \text{Па}$	-	21	21	21	15.8	5
	$R_A, *10^9 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$	-	6.6	9.5	13.2	10.3	16
Динам. параметры	$\Delta\phi, ^\circ$	7	55	59	55	55	37
	$M$	-	2.3	1.4	1.2	1.5	-
	$\lambda$	0.4	3.7	5.1	7.3	4.8	3.4

Рассмотренные критерии ДК дают возможность установить параметры РС-цепи, обеспечивающие высокое ДК САР. Однако при этом следует иметь в виду следующее.

1) При использовании критерия  $\Delta\phi$  достаточно просто его определение через  $W_p$ , но требуется его дополнительная проверка по динамике (например, в пакете МВТУ) с учетом неоднозначности ДК, зависящего от  $\omega_{\text{ср}}$ ;

2) Использование критерия М может иметь ограничения, т.к. не каждая ЛАХЧ содержит  $\omega_{\text{ср}}$  на участке ее наклона -20 дБ/дек;

3) Расчет ДК по критерию  $\lambda$ , с одной стороны, является более громоздким (при отсутствии его автоматизации [8]), а с другой стороны, не каждая АЧХ имеет две расчетные частоты ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) при пересечении ее по уровню  $A = A_{\max} / \sqrt{2}$ .

Подтверждение эффективности коррекции ГСП производится расчетом и построением переходных процессов (ПП).

Таким образом, в результате проведенных исследований показана достаточная эффективность применения критериев оценки ДК и самой коррекции ГСП средствами РС–цепей, и установлены существенные возможные ограничения их использования.

#### Список литературы

1. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Петков П.П., Прокопенко В.А. Расчет, моделирование и конструирование оборудования с компьютерным управлением: практикум. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 56 с.
2. Бундур М.С. Теория автоматического управления: Учебное пособие / М.С. Бундур, Н.А. Пелевин, В.А. Прокопенко, И.А. Чернов – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 76 с.
3. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Моделирование шпиндельных гидростатических подшипников и исследование возможностей повышения их динамического качества // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – Т. 64, № 6. – С. 32-37.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М: Машиностроение, 1983. – 608 с.
5. Прокопенко В.А., Яцкевич А.А. Динамические характеристики гидростатических подшипников тяжелых металлорежущих станков // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. – Л: ЛГТУ, 1990. – С. 7-14.
6. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
7. Козлов О.С., Скворцов Л.М. Программный комплекс "МВТУ" в научных исследованиях и прикладных разработках // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27, № 11. – С. 32-46.
8. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Совершенствование расчетно-вычислительной базы для повышения уровня подготовки специалистов-станкостроителей // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 896-904.

#### Сведения об авторах:

*Прокопенко Вячеслав Алексеевич* – к.т.н., доцент, СПбПУ, г.Санкт-Петербург;

*Семенюк Никита Анатольевич* – студент, СПбПУ, г.Санкт-Петербург;

*Баранов Матвей Антонович* – студент, СПбПУ, г.Санкт-Петербург.