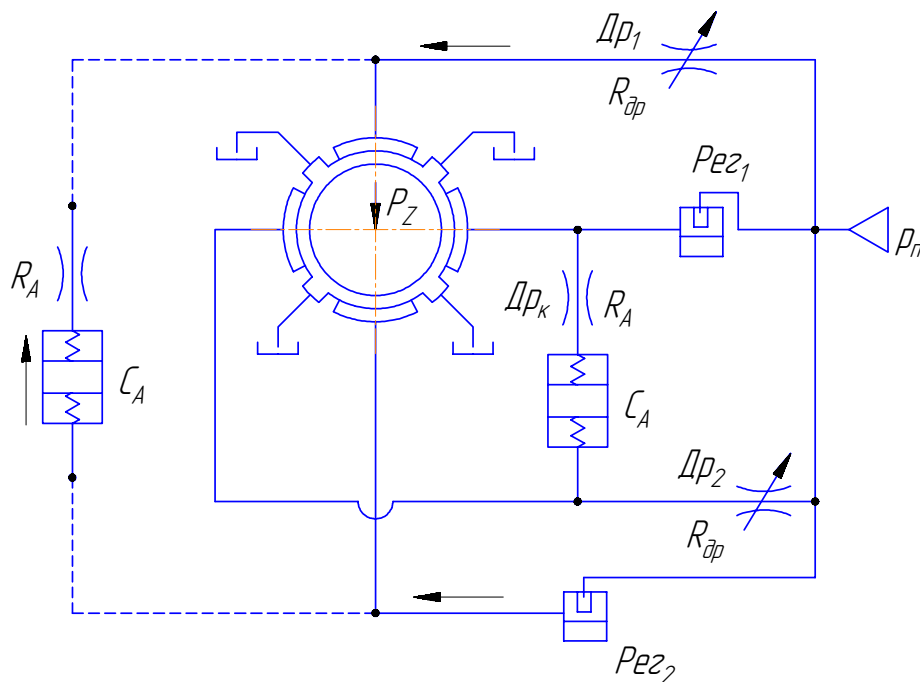


## ДИНАМИКА ШПИНДЕЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛЯТОРАМИ

Определение путей повышения динамического качества шпиндельных гидростатических подшипников (ГСП) является важнейшим направлением развития и совершенствования металлорежущих станков (МРС).

В последнее время к МРС предъявляются повышенные требования обеспечения быстротходности на чистовых операциях, особенно при обработке легких сплавов и других современных конструкционных материалов. При работе на таких режимах неизбежно проявляется колебательность динамической системы ГСП, которая негативно сказывается на общей виброустойчивости станка. Достаточно эффективным способом улучшения демпфирующих свойств ГСП является введение корректирующих RC-цепей, подключаемых между противоположными опорами ГСП (рис. 1) и представляющих собой последовательно включенные гидравлическое сопротивление  $R_A$  и гидравлическую емкость  $C_A$ . При выборе параметров коррекции необходимо учитывать влияние нелинейности математической модели ГСП и проводить проверку достаточности демпфирования в совокупности как на чистовых режимах обработки (малых нагрузках), так и на черновых (при наибольших нагрузках).

При решении рассматриваемой проблемы представляет интерес также исследование возможностей замены традиционно используемой в ГСП дроссельной схемы управления на управление с функциональными регуляторами. Наилучшими эксплуатационными характеристиками, как известно, обладает мембранный регулятор [1].



*Рис. 1. Расчетная гидравлическая схема ГСП с регуляторами*

Система дифференциальных уравнений, представляющая собой математическое описание нелинейной модели ГСП, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 M\ddot{h}_1 &= P_Z + \frac{p_1}{2}(l_1 B_1 + b_1 L_1) - \frac{p_0}{2}(l_0 B_0 + b_0 L_0) - \frac{\mu \dot{h}_1}{4h_1^3} \left[ (B_1 - b_1)^3 l_1 + (L_1 - l_1)^3 b_1 \right] - \\
 &- \frac{\mu \dot{h}_1}{4h_0^3} \left[ (B_0 - b_0)^3 l_0 + (L_0 - l_0)^3 b_0 \right], \\
 \frac{p_n - p_1}{R_{дп1}} &= \frac{p_1 h_1^3}{3\mu} \cdot \left( \frac{l_1}{B_1 - b_1} + \frac{b_1}{L_1 - l_1} \right) + \frac{V_{нп1}}{E_M} \dot{p}_1 + \dot{h}_1 (B_1 l_1 + b_1 L_1 - 2l_1 b_1), \\
 \frac{p_n - p_0}{k_p \cdot \mu} H_p^3 &= \frac{p_0 h_0^3}{3\mu} \cdot \left( \frac{l_0}{B_0 - b_0} + \frac{b_0}{L_0 - l_0} \right) + \frac{V_{нп0}}{E_M} \dot{p}_0 + \dot{h}_0 (B_0 l_0 + b_0 L_0 - 2b_0 l_0) + Q_d, \\
 H_p &= H_0 + \Delta H = H_0 + e p_0, \\
 h_0 &= h_\Sigma - h_1,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения:

- $M$  – приведенная масса шпиндельного узла;
- $P_Z$  – внешняя нагрузка;
- $p_i$  – давление питания;
- $h_1$  и  $h_0$  – зазоры в основной и замыкающей опорах ГСП;
- $h_\Sigma = h_0 + h_1$  – суммарный зазор в ГСП;
- $p_1$  и  $p_0$  – давление жидкости в основной и замыкающей опорах;
- $B, L$  – ширина и длина опоры ГСП;
- $b, l$  – ширина и длина кармана опоры;
- $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;
- $R_{а0}$  – гидравлическое сопротивление дросселей;
- $V_{i0}$  – приведенные объемы карманов;
- $E_M$  – модуль объемной сжимаемости жидкости;
- $Q_a$  – величина расхода, обусловленного прогибом диафрагмы;
- $H_p$  – величина зазора в регуляторе ( $H_0$  – начальный зазор в регуляторе);
- $e$  – податливость мембраны регулятора.

Расчет регулятора производится по методике [1]. В результате определены следующие его параметры: диаметр мембраны, толщина мембраны, ее податливость и начальный зазор.

Линеаризация системы (1) проводится разложением в ряд Тейлора в окрестности начальной точки пространства. После преобразования по Лапласу линеаризованной системы, переходя к операторной форме записи и вводя обозначения коэффициентов и постоянных времени, систему в отклонениях представим в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 k_1 (T_1 S + 1) \cdot S \cdot \Delta h_1 &= \Delta P_Z + k_{21} \Delta p_1 - k_{20} \Delta p_0, \\
 -k_{41} (T_{31} S + 1) \Delta h_1 &= k_{31} (T_{21} S + 1) \Delta p_1, \\
 -k_{40} (T_{30} S + 1) \Delta h_0 - k_{50} (T_{40} S - 1) \Delta H_p &= k_{30} (T_{20} S + 1) \Delta p_0, \\
 \Delta h_1 &= -\Delta h_0, \\
 \Delta H_p &= k_6 \Delta p_0,
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (2), приведена на рис. 2.

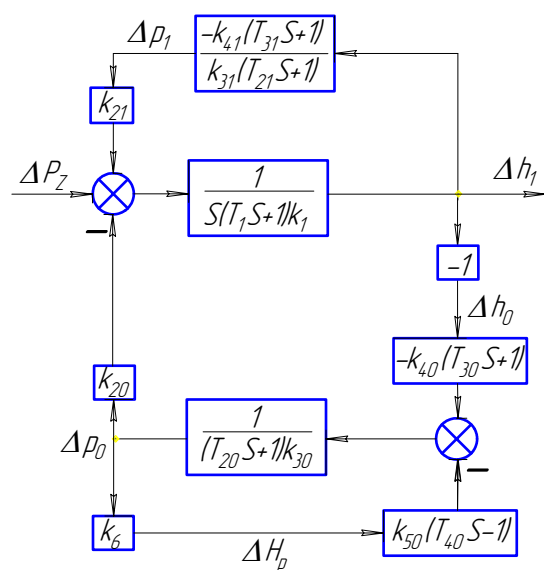


Рис. 2. Структурная схема САР ГСП с регулятором

Передаточная функция разомкнутой системы автоматического регулирования (САР) ГСП, соответствующая структурной схеме на рис. 2, имеет вид:

$$W_{\text{раз}}(S) = \frac{k \cdot (T_3 S + 1) \cdot (T_4 S + 1)}{S \cdot (T_1 S + 1) \cdot (T_{21} S + 1) \cdot (T_{22} S + 1)}. \quad (3)$$

Анализ динамического качества ГСП выполнен с использованием методов теории автоматического регулирования (ТАР) на базе логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазо-частотных (ЛФЧХ) характеристик для САР с последующей проверкой расчетом переходных процессов при ступенчатом нагружении как малыми, так и большими нагрузками с учетом нелинейности исходной математической модели.

Последующие расчеты выполнены применительно к условиям серийного тяжелого гибкого расточного модуля модели ЛР400ПМФ4, имеющего шпиндельный узел с ГСП дроссельного управления со следующими параметрами:

- диаметр шпинделя  $D = 125 \text{ мм}$  ;
- максимальная частота вращения  $n_{\text{max}} = 3125 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$  ;
- максимальная внешняя нагрузка  $P_{Z \text{ max}} = 10 \text{ кН}$  ;
- размеры опоры  $L = B = 90 \text{ мм}$  ;
- размеры кармана  $l = b = 78 \text{ мм}$  ;
- суммарный зазор в ГСП  $h_{\Sigma} = 90 \text{ мкм}$  .

Основным параметром при оценке динамического качества является запас по фазе  $\Delta\varphi$  на частоте среза  $\omega_{\text{ср}}$  [2].

На рис. 3 кривая 1 – ЛАЧХ исходного для станка ЛР400ПМФ4 дроссельного варианта ГСП (вариант 1), а кривая 1' – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом составляет  $\Delta\varphi_1 = 7,2^\circ$  на частоте среза  $\omega_{\text{ср}1} = 4058 \text{ с}^{-1}$ , что значительно ниже минимально допустимого запаса 40% [2].

Кривая 2 – ЛАЧХ варианта ГСП с регулятором (вариант 2), а кривая 2' – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом увеличивается до  $\Delta\varphi_2 = 10,1^\circ$  на час-

тоте среза  $\omega_{ср2} = 3565 \text{ с}^{-1}$  (т.е. на 40% больше исходного варианта), что также ниже упомянутого минимально допустимого запаса.

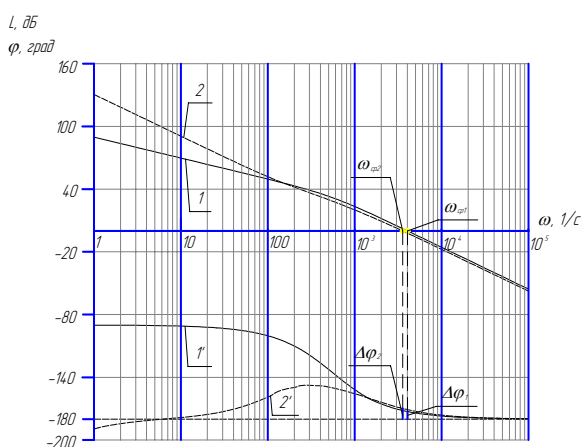


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ для ГСП с дроссельным (кривые 1-1') и регуляторным (кривые 2-2') управлением

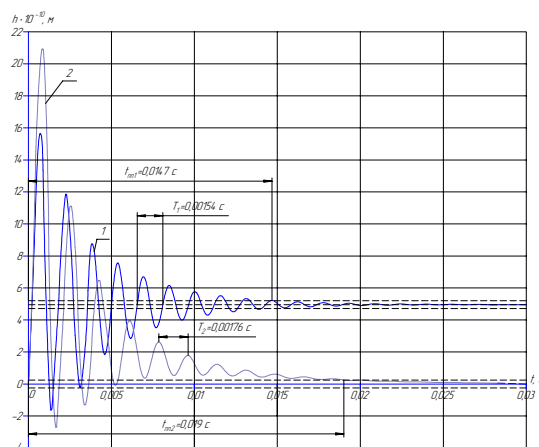


Рис. 4. Переходные процессы для вариантов 1 и 2 САУ ГСП

Для дополнительной оценки и анализа динамического качества ГСП выполнены расчёты переходных процессов при малых нагрузках (чистовые режимы резания) на базе программного комплекса SIAM [3].

Из анализа полученных переходных процессов (рис. 4) следует: для схемы управления ГСП по варианту 1 время переходного процесса  $t_{11} = 0,0147 \text{ с}$  и собственная частота  $\omega_{01} = 4078 \text{ с}^{-1}$ .

Схема управления по варианту 2 позволяет свести к нулю статическую ошибку. При этом динамическая ошибка увеличивается незначительно (на 34%), а время переходного процесса увеличивается на 29%. Сопоставление по декременту колебаний  $\lambda$  показывает, что по варианту 2  $\lambda_2 = 0,6$  и превышает на 57,9% декремент по варианту 1.

Периоды собственных колебаний для схем управления по варианту 1 и 2 составляют  $\tau_2 = 0,0017 \text{ с}$ , т.е. собственная частота  $\omega_{02} = 3568 = 560 \text{ Гц}$ , что превышает нижний предел по требованиям виброустойчивости [4]. Это на практике позволяет эксплуатировать ГСП на станке в исходном варианте 1, несмотря на упомянутое низкое значение запаса по фазе.

Для оценки возможностей повышения динамического качества ГСП по варианту 2, скорректированного RC-цепью, рассчитаны переходные процессы и определены для различных условий работы логарифмические декременты колебаний.

Для определения оптимальных параметров коррекции построена трехмерная зависимость  $\lambda = f(C_A, R_A)$ , приведенная на рис. 5.

Анализ поверхности показывает, что декремент колебаний растет как с увеличением емкости  $C_A$ , так и с увеличением сопротивления  $R_A$ , но в отличие от дроссельного ГСП для рассматриваемых диапазонов параметров коррекции  $C_A$  и  $R_A$  не имеет максимума.

- Вариант коррекции выбран с учетом возможностей реализации RC-цепи на базе стандартного металлического сильфона (ГОСТ 21482-76), обеспечивающего наилучшие характеристики при эксплуатации по сравнению с другими исполнениями RC-цепи [5].

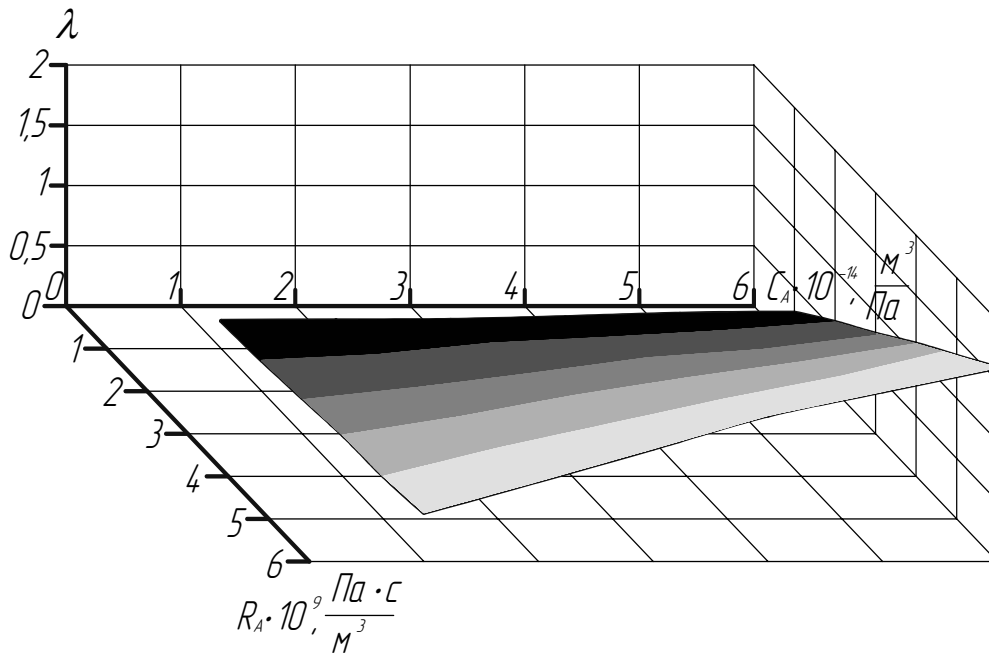


Рис. 5. Зависимость  $\lambda = f(C_A, R_A)$  для скорректированной RC-цепью САР регуляторного ГСП

Основные параметры сильфона емкостью  $C_A = 4,96 \cdot 10^{-14} \text{ i}^3/\text{I} \cdot \text{a}$  (с учетом ограничения по давлению) следующие: длина – 16 мм; диаметр – 11 мм; количество гофров – 10; толщина стенки – 0,16 мм; наибольшее давление – 14,5 МПа.

Для выбора значения сопротивления  $R_A$  анализируется зависимость  $\lambda = f(R_A)$  при упомянутом значении  $C_A$ , откуда определяется соответствующее значение  $R_A = 20 \cdot 10^9 (\text{I} \cdot \text{a} \cdot \text{h})/\text{i}^3$ .

Для варианта коррекции с определенными анализом параметрами рассчитаны переходные процессы при малых (рис. 6, а) и больших (рис. 6, б) нагрузках.

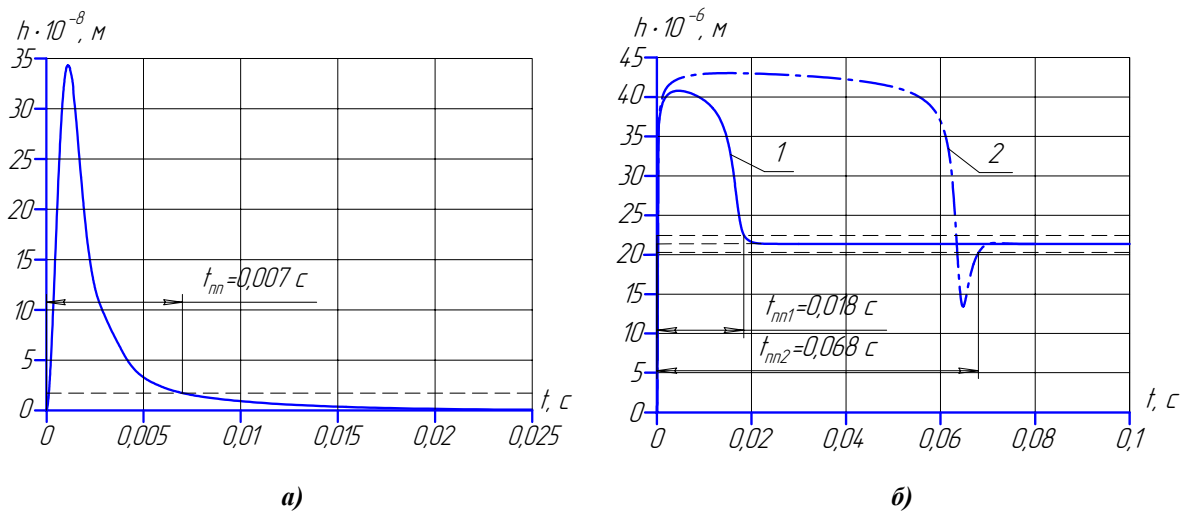


Рис. 6. Переходный процесс для САР регуляторного ГСП при малых нагрузках (а) и при нагрузке 50 кН (б) (1 – без коррекции; 2 – с RC-коррекцией при оптимальных параметрах)

Анализ переходных процессов на рис. 6 показывает, что коррекция ГСП по варианту 2 позволяет полностью исключить колебательность САР, тогда как достичь этого для скорректированного ГСП по варианту 1 невозможно. Таким образом, на чистовых режимах обработки коррекция ГСП по варианту 2 эффективнее, чем коррекция дроссельного ГСП, т.к. обеспечивает увеличение демпфирования и получение САР с высоким динамическим качеством.

Из анализа переходных процессов при больших нагрузках (намного превышающих паспортные значения для станка ЛР400ПМФ4) следует, что рассматриваемый вариант коррекции практически не ухудшает динамическое качество САР при больших нагрузках (черновые режимы обработки). При использовании коррекции время переходного процесса относительно варианта 2 без корректора  $t_{\text{т1}} = 0,018$  с, хотя и несколько увеличивается, колебательность почти не проявляется.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидростатические направляющие с регуляторами. Расчет и проектирование. Рекомендации / **Е.М. Якир, Г.А. Левит, Б.Г. Лурье.** – М.: ЭНИМС, 1970. – 64 с.
2. **Иващенко Н.Н.** Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. Исследования на ЭВМ динамических моделей гидро- и пневмосистем: Методические указания / **В.С. Бурлуцкий, М.Я. Либин, Лю Вэй, В.А. Прокопенко, М. Франк, А.А. Яцкевич.** – СПб.: СПбГТУ, 1997. – 24 с.
4. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных ВТУЗов / Под ред. **В.Э. Пуша.** – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
5. **Удовкина С.С., Прокопенко В.А.** Сильфонный гидрокорректор. В сб.: XXXI Неделя науки СПбГПУ. – СПб: СПбГПУ, 2003. – С.19-20.

*Поступила в редакцию 17.01.2007*

*После доработки 15.02.2007*