

УДК 621.822.172

ДИНАМИКА ШПИНДЕЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИАФРАГМЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

В.А. Прокопенко, И.А. Чернов

Приведены результаты исследования динамического качества гидростатических подшипников шпиндельных узлов современных металлорежущих станков. Дана математическая модель гидростатического подшипника. Рассмотрены возможности использования регуляторов с целью улучшения виброустойчивости. Предложена методика выбора параметров корректирующих РС-цепей. Рассчитаны переходные процессы при различных режимах работы, построены соответствующие частотные характеристики.

Ключевые слова: гидростатический подшипник, шпиндельный узел, виброустойчивость, динамические характеристики, мембранный регулятор, РС-коррекция.

Актуальность проблемы. Постановка задачи

Повышение динамического качества технических систем и оборудования является основной задачей при их создании и эксплуатации. Применительно к металлорежущим станкам (МРС) одна из основных проблем – это обусловленная требованиями роста производительности и качества обработки потребность увеличения виброустойчивости, которая практически не может быть удовлетворена при использовании в шпиндельных узлах (ШУ) традиционных подшипников качения [1]. Эффективным решением может служить переход к внедрению опор жидкостного трения – гидростатических подшипников (ГСП). Такой положительный опыт получен при создании отечественного серийного гибкого производственного модуля ЛР400ПМФ-4. Выполненные исследования [1] показывают, что, при обеспечении роста динамического качества ГСП и МРС в целом, в случае использованной в станке дроссельной схемы управления, система автоматического регулирования (САР) является все-таки колебательной, и устранить этот недостаток практически невозможно ни параметрически, ни смещением оси шпинделя, ни введением корректирующих РС-цепей.

Существенный интерес представляют результаты исследования возможностей введения в схемы управления ГСП с традиционно применяемыми дросселями мембранных (диафрагменных) регуляторов, обладающих наилучшими эксплуатационно-техническими характеристиками по сравнению с другими типами регуляторов. При этом возможны следующие варианты схемы управления опор ГСП в ШУ:

1. в передней опоре (ПО) ШУ используются мембранный регулятор и дроссель типа «сопло–заслонка», в задней опоре (ЗО) – два дросселя (рис. 1, а);
2. в ПО и ЗО ШУ используется мембранный регулятор и дроссель типа «сопло–заслонка» (рис. 1, б).

При анализе статической жесткости вариантов сопоставлены радиальные смещения шпинделя на кромке переднего ГСП и на максимальном вылете, включающие деформации упругой линии самого шпинделя и статическую ошибку в ГСП. При этом рассмотрены отдельно нагрузочные и разгрузочные ветви соответствующих статических характеристик.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. По исходному варианту дроссельного ГСП для обеих ветвей статической характеристики смещение на кромке ГСП при любых режимах обработки практически одинаково и составляет на максимальной нагрузке около 50% начального зазора. Введение регулятора по варианту 1 позволяет несколько увеличить нагрузочную способность ГСП во всем диапазоне нагрузок. Подобная дополнительная замена дросселя на регулятор в ЗО (вариант 2) существенно на общей жесткости ШУ не сказывается, значительно усложняя при этом как конструкцию ШУ, так и настройку его ГСП.

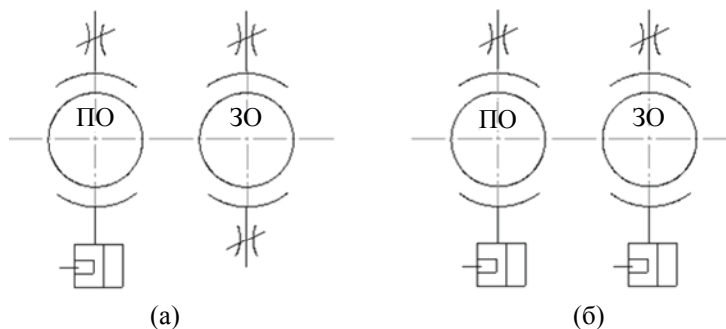


Рис. 1. Управление опорами ГСП по схеме «регулятор–дроссель» (а) и «регулятор–регулятор» (б)

Таким образом, по статическим свойствам все варианты практически эквивалентны, что обусловлено доминирующим влиянием существенно более низкой жесткости консольного шпинделя. Далее сравниваются исходный вариант и более простой из регуляторных вариант 1.

Динамические характеристики ГСП влияют на общую виброустойчивость МРС в целом, т.е. производительность и качество обработки. Следовательно, анализ поведения САР рассматриваемых ГСП с различными системами управления в динамике является важным этапом процесса проектирования, а также оценки его результатов.

Краткое описание математической модели

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

$$\begin{cases} M\ddot{h}_1 = P_z + \frac{P_1}{2}(l_1 B_1 + b_1 L_1) - \frac{P_0}{2}(l_0 B_0 + b_0 L_0) - \frac{\mu \dot{h}_1}{4h_1^3} [(B_1 - b_1)^3 l_1 + (L_1 - l_1)^3 b_1] - \\ - \frac{\mu \dot{h}_1}{4h_0^3} [(B_0 - b_0)^3 l_0 + (L_0 - l_0)^3 b_0]; \\ \frac{p_n - p_1}{R_{др1}} = \frac{p_1 h_1^3}{3\mu} \left(\frac{l_1}{B_1 - b_1} + \frac{b_1}{L_1 - l_1} \right) + \frac{V_{np1}}{E_m} \dot{p}_1 + \dot{h}_1 (B_1 l_1 + b_1 L_1 - 2l_1 b_1); \\ \frac{p_n - p_0}{k_p \mu} H_p^3 = \frac{p_0 h_0^3}{3\mu} \left(\frac{l_0}{B_0 - b_0} + \frac{b_0}{L_0 - l_0} \right) + \frac{V_{np0}}{E_m} \dot{p}_0 + \dot{h}_0 (B_0 l_0 + b_0 L_0 - 2l_0 b_0) + Q_d, \end{cases} \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения: M – приведенная масса ШУ; P_z – внешняя нагрузка; p_n – 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 и L – ширина и длина опоры ГСП; b и l – ширина и длина кармана опоры; μ – динамическая вязкость жидкости; $R_{др}$ – гидравлическое сопротивление дросселей; V_{np} – приведенные объемы карманов; E_m – модуль объемной сжимаемости жидкости; Q_d – величина расхода, обусловленного прогибом диафрагмы; $H_p = H_0 + \Delta H = H_0 + ep_0$ – величина зазора в регуляторе (H_0 – начальный зазор в регуляторе; e – податливость мембраны регулятора). Первое уравнение системы является уравнением динамического равновесия шпинделя на ГСП. Остальные два – это уравнения баланса расходов жидкости (масла) через опоры ГСП с учетом вязкости и сжимаемости [2].

Расчет регулятора производится по методике [3]. 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, система в отклонениях представляется в виде

$$\begin{cases} k_1 (T_1 S + 1) S \Delta h_1 = \Delta P_z + k_{21} \Delta p_1 - k_{20} \Delta p_0, \\ -k_{41} (T_{31} S + 1) \Delta h_1 = k_{31} (T_{21} S + 1) \Delta p_1, \\ k_{40} (T_{30} S + 1) \Delta h_1 - k_{50} (T_{40} S - 1) \Delta p_0 = k_{30} (T_{20} S + 1) \Delta p_0, \end{cases}$$

где k_i и T_{ij} – коэффициенты и постоянные времени САР ГСП.

Анализ динамических свойств системы

Анализ динамического качества ГСП выполнен с использованием прикладных пакетов MBTU и Matlab на базе известных методов теории автоматического управления по логарифмическим амплитудно-частотным (ЛАЧХ) и фазо-частотным (ЛФЧХ) характеристикам 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 модуля ЛР400ПМФ4, имеющего ШУ на ГСП со следующими параметрами: радиальная составляющая силы резания – 0–10 кН; давление питания – 8,5 МПа; максимальная частота вращения шпинделя – 4000 об/мин; мощность привода главного движения – 30 кВт; диаметр шпинделя – 125 мм.

Основным критерием при оценке динамического качества по ЛАЧХ и ЛФЧХ является запас по фазе $\Delta\phi$ на частоте среза ω_{cp} [4].

На рис. 2 кривая 1 – ЛАЧХ исходного для станка ЛР400ПМФ4 дроссельного варианта ГСП, а кривая 1' – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом составляет $\Delta\varphi_1 = 7,2^\circ$ на частоте среза $\omega_{ср1} = 4058\text{ с}^{-1}$, что значительно ниже минимально допустимого значения $\Delta\varphi = 40^\circ$ [4].

Кривая 2 – ЛАЧХ варианта ГСП с регулятором (вариант 1), а кривая 2' – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом увеличивается до $\Delta\varphi_2 = 10,1^\circ$ на частоте среза $\omega_{ср2} = 3565\text{ с}^{-1}$ (т.е. на 40% больше исходного варианта), что также ниже упомянутого минимально допустимого запаса.

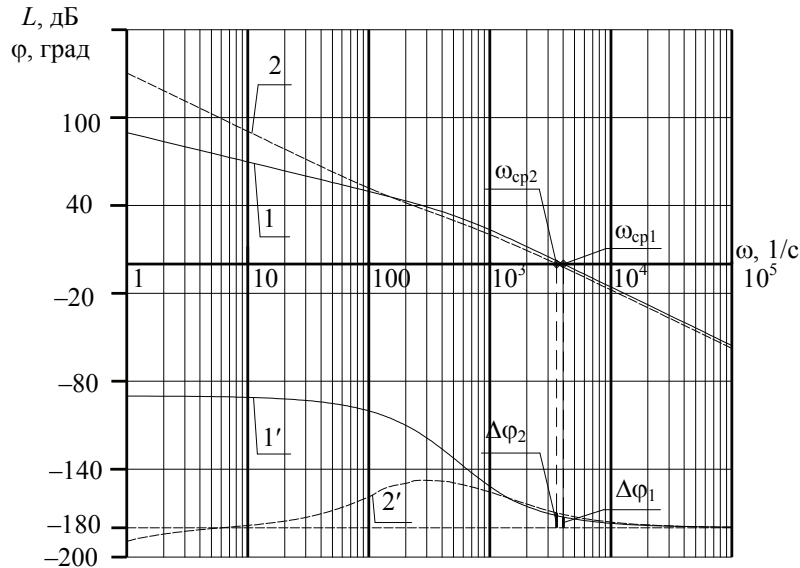


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ для ГСП с дроссельным (кривые 1–1') и регуляторным (кривые 2–2') управлением

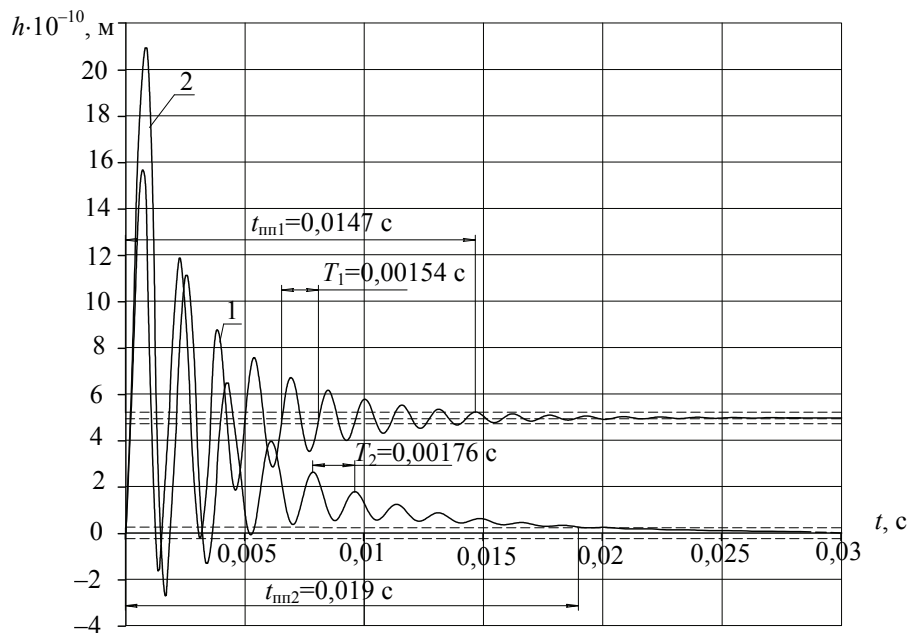


Рис. 3. Переходные процессы для исходного варианта (кривая 1) и варианта с использованием регулятора (кривая 2)

Таким образом, установлено, что использование регуляторов несколько повышает виброустойчивость ШУ, снижая частоту колебаний и статическую ошибку (рис. 3), однако дальнейшее улучшение динамических свойств ГСП является необходимым. Одним из весьма эффективных способов коррекции динамического качества ГСП может служить включение в гидравлическую схему ГСП корректирующих RC-цепей аналогично тому, как это рассмотрено для дроссельной варианта схемы управления [1]. Система уравнений в отклонениях, описывающая скорректированный RC-цепью вариант регуляторного ГСП, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} k_1 (T_1 S + 1) S \Delta h_1 = \Delta P_z + k_{21} \Delta p_1 - k_{20} \Delta p_0; \\ -k_{41} (T_{31} S + 1) \Delta h_1 = \left(k_{31} (T_{21} S + 1) + \frac{1}{R_A} \cdot \frac{T_A S}{T_A S + 1} \right) \Delta p_1 - \frac{1}{R_A} \cdot \frac{T_A S}{T_A S + 1} \Delta p_0; \\ k_{40} (T_{30} S + 1) \Delta h_1 - k_{50} (T_{40} S - 1) \Delta p_0 = \left(k_{30} (T_{20} S + 1) + \frac{1}{R_A} \cdot \frac{T_A S}{T_A S + 1} \right) \Delta p_0 - \\ - \frac{1}{R_A} \cdot \frac{T_A S}{T_A S + 1} \Delta p_1, \end{cases} \quad (2)$$

где T_A – постоянная времени, обусловленная подключением корректирующей RC-цепи.

Выбор параметров коррекции может производиться с использованием системы уравнения (2) по трехмерной поверхности зависимости запаса по фазе $\Delta\varphi$ либо логарифмического декремента колебаний λ от C_A и R_A . Анализ такой трехмерной поверхности для варианта 1 показывает, что декремент растет как с увеличением емкости C_A , так и с увеличением сопротивления R_A (рис. 4), но в отличие от дроссельного ГСП для рассматриваемых диапазонов параметров коррекции C_A и R_A не имеет максимума в зависимости от величины сопротивления R_A при каждом значении C_A .

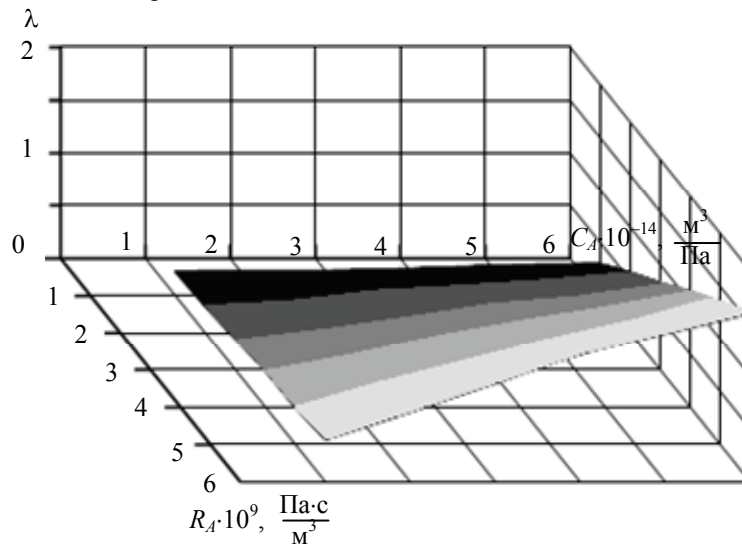


Рис. 4. Зависимость $\lambda = f(C_A, R_A)$ для ГСП с регуляторным управлением при подключенной RC-цепи

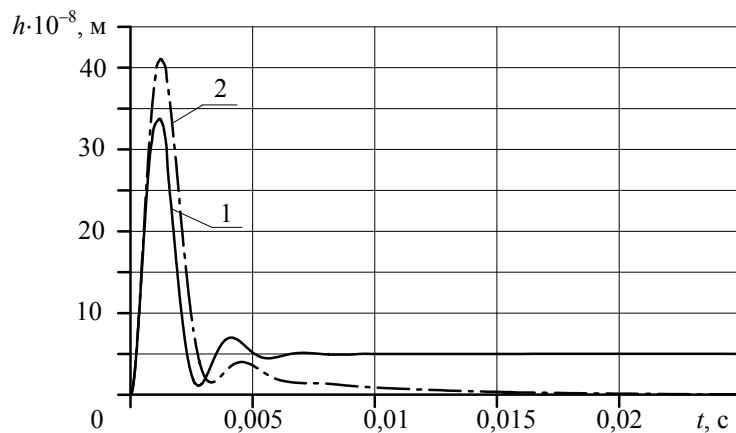


Рис. 5. Переходные процессы в ГСП при подключенной RC-цепи: 1 – исходный вариант ГСП; 2 – вариант ГСП с использованием регулятора

При выборе значения емкости $C_A = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$ (с учетом ограничения по давлению) оказывается, что коррекция с параметрами $C_A = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$ и $R_A = 12 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, являющаяся наилучшей для дроссельного варианта ГСП, не является таковой для регуляторного варианта ГСП, хотя при этом снижает колебательность ГСП относительно варианта без коррекции в 4,6 раза и увеличивает демпфирование по сравнению с скорректированным исходным вариантом (рис. 5).

При увеличении сопротивления R_A для варианта 1 установлен наилучший вариант коррекции RC-цепью для регуляторного ГСП – при значениях параметров $C_A = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$ и $R_A = 20 \cdot 10^9 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$, что подтверждается переходными процессами при малых (рис. 6, а) и больших (рис. 6, б) нагрузках.

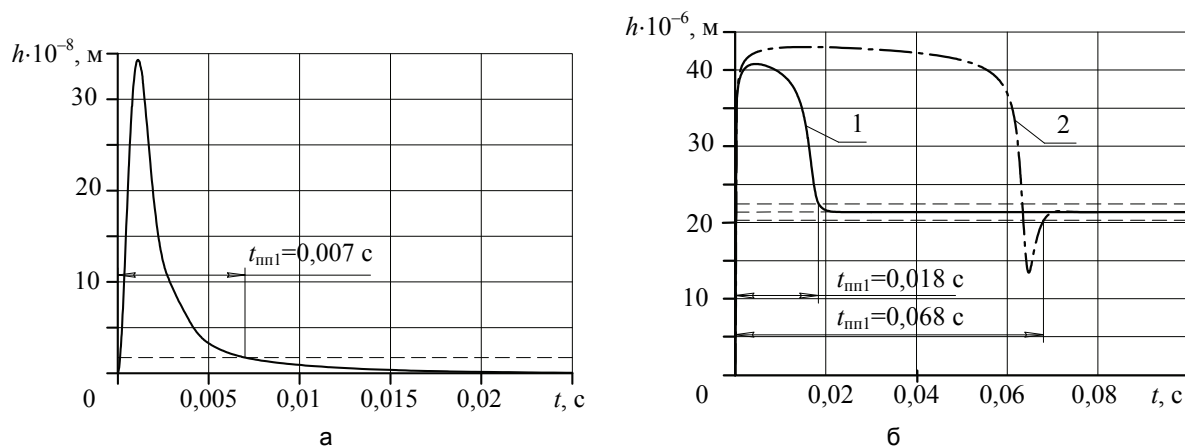


Рис. 6. Переходный процесс для регуляторной САР ГСП с RC-цепью для $C_A = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$ и $R_A = 20 \cdot 10^9 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$, при малых нагрузках (а); при нагрузке 50 кН (1 – вариант без коррекции; 2 – вариант с параметрами коррекции $C_A = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$ и $R_A = 20 \cdot 10^9 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$) (б)

Анализ этих зависимостей показывает, что коррекция ГСП с регулятором позволяет свести к нулю колебательный характер движения системы, тогда как достичь этого для скорректированного ГСП по исходному дроссельному варианту не представляется возможным. Таким образом, коррекция регуляторного ГСП эффективнее дроссельного и обеспечивает увеличение демпфирования с получением САР высокого динамического качества.

Из анализа переходных процессов при больших нагрузках можно сделать вывод, что рассматриваемый вариант коррекции существенно не ухудшает динамическое качество системы. При использовании коррекции время переходного процесса относительно варианта 2 без корректора ($t_{nnl} = 0,018 \text{ с}$) хотя и несколько увеличивается, но колебательность фактически отсутствует.

Заключение. Рекомендации

Данные исследования показали, что использование регуляторов в схеме управления ГСП, а также подключение корректирующей RC-цепи дает значительное повышение виброустойчивости ШУ на ГСП (вплоть до полного устранения колебаний в системе). Реализация определенной при исследованиях гидравлической емкости C_A наилучшим образом может быть осуществлена с помощью стандартного металлического сильфона [5], характеризуемого следующими параметрами: длина – 16 мм; диаметр – 11 мм; количество гофров – 10; толщина стенки – 0,16 мм; наибольшее давление – 14,5 МПа. Гидравлическое сопротивление R_A корректора выполняется аналогично конструкции дросселей в исходном варианте на базе сопротивления «сопло–заслонка», при котором режим течения жидкости – ламинарный, а величина расчетного зазора составляет около 0,2 мм. Расчет параметров ГСП и исследование их динамических свойств при различных способах коррекции, построение переходных процессов и частотных характеристик можно выполнять с использованием программных систем Mathcad или Matlab, а также ряда программных комплексов для динамического моделирования (SIAM, MBTU).

Литература

1. 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. – № 6 (64). – С. 32–38.
2. Проектирование гидростатических направляющих металлорежущих станков и станочных комплексов: Метод. указания / Под ред. М.А. Болотникова, В.Г. Лебедева, П.П. Петкова и др. – СПб: СПбГТУ, 1993. – 28 с.
3. Гидростатические направляющие с регуляторами. Расчет и проектирование. Рекомендации / Е.М. Якир, Г.А. Левит, Б.Г. Лурье. – М.: ЭНИМС, 1970. – 64 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
5. ГОСТ 21482-76. Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. – Введ. 01.01.77. – М.: Госстандарт, 1977. – 122 с.

- Прокопенко Вячеслав Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
кандидат технических наук, доцент, prokopenko@gak.spb.su
- Чернов Иван Александрович* – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
кандидат технических наук, доцент, chernov@gak.spb.su