

УДК 62-752.8(088.8)

**ГАПОНОВ В.С.**, д.т.н., проф., НТУ «ХПІ»  
**НАУМОВ А.И.**, инж., НТУ «ХПІ»

## УПРУГАЯ ОПОРА ПОДШИПНИКОВ РОТОРА С УПРАВЛЯЕМЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ

Запропоновано схемне рішення для пружної опори надшвидкісних роторів. Дано обґрунтування необхідності керованої зміни квазінульової жорсткості такої опори по низькочастотній складовій зовнішнього навантаження.

**Введение.** Основным путем технического прогресса для многих отраслей машиностроения является увеличение скорости вращения ротора. По этой причине разрабатываются роторы, скорость вращения которых выше первой или даже второй их критической скорости. Несмотря на достигнутые успехи в точности балансировки и применение упруго-демпферных опор подшипников, одной из проблем быстровращающихся роторов является оптимальное проектирование пассивных упругих опор с минимально возможной жесткостью в динамических режимах и достаточной в статике для устранения противоречия между статической и динамической жесткостями, обеспечения необходимой несущей способности роторной системы для всего диапазона её рабочих частот.

Такой подход к конструированию роторных машин позволяет разрабатывать машины, роторы которых проходят зоны первой и второй критических скоростей с малыми амплитудами и виброперегрузками, без изгибных колебаний. Рабочие скорости при этом располагаются в зоне самоцентрирования.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросы эффективности применения упругих опор подшипников и их схемные решения рассмотрены в [1,2,3].

**Цель и постановка задачи.** Целью настоящей работы является обоснование схемного решения упругой опоры подшипников высокоскоростных роторов.

**Упругая опора ротора с управляемым изменением.** Известное противоречие между статической и динамической жесткостями высокоскоростных роторов эффективно решается путем применения в опорах подшипников нулевой или почти нулевой (квазінульової) жесткости.

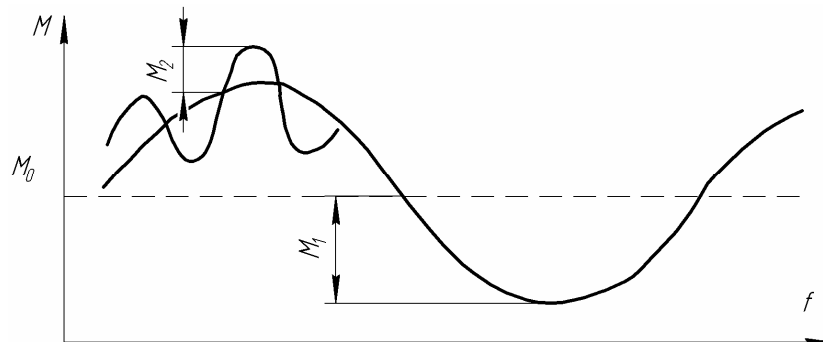


Рисунок 1 – График изменения внешней нагрузки

Эффективность работы таких систем прямо связана с решением проблемы их настройки. Малая жесткость упругой связи требует достаточно точную настройку на расчетную нагрузку: изменение величины этой нагрузки приводит к расстройству системы, центр колебаний системы смещается к области интервала перемещения с повышенной жесткостью. Таким образом, изменение величины внешней нагрузки на ротор, приводит к резкому снижению его динамической жесткости вследствие уменьшения эффекта самоцентрирования.

Обозначенное противоречие, сопутствующее опорам подшипников с малой жесткостью, предопределяет потребность разработки схемных решений и конструкций упругих опор, которые допускают их автоматическую перестройку на различные нагрузки, то есть опор с управляемым изменением квазиулевого жесткости.

Внешние воздействия на роторную систему чаще всего должны быть описаны случайными функциями времени. При этом возникает трудность принципиального характера – информация о внешнем воздействии, как правило, не полная и приходится рассматривать некоторые типовые воздействия, обеспечивающие проектирование роторной системы с запасами прочности. Для вынужденных режимов в качестве типового применяется полигармоническое, для переходного режима – ударное.

Постоянная составляющая внешнего возмущения определяет постоянную составляющую динамического отклика роторной системы и, следовательно, ее несущую способность. Гармонические составляющие – динамические составляющие.

Внешние нагрузки, для которых постоянная составляющая не является стабильной и может медленно (с ускорениями, не влияющими на динамику системы) изменяться по произвольному закону ( Рис. 1)

$$M(t) = M_0 + M_1 \cdot \sin \omega_1 t + M_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi) \quad (1)$$

где  $M_0$  - постоянная часть несущей составляющей;  $M_1$  - гармоническая составляющая внешнего возмущения;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - соответственно, частоты гармонической части несущей составляющей внешнего возмущения;  $\varphi$  - начальная фаза.

Рассматриваемая опора подшипников ротора [3] состоит из трех основных частей, которые механически связаны между собою: несущей системы, корректора жесткости и системы регулирования. Несущая система обеспечивает необходимую несущую способность ротора в рабочем режиме. Корректор жесткости за счет параллельного подключения к несущей системе упругих элементов, которые имеют отрицательную жесткость, обеспечивает реализацию упругой характеристики с участком квазиулевого жесткости на рабочем режиме работы системы. Автоматическая поддержка участка квазиулевого жесткости упругой характеристики в положении, которое отвечает рабочему режиму, осуществляется пассивным регулятором.

При изменении постоянной или низкочастотной составляющей внешней нагрузки регулятор автоматически изменяет положения опорной точки  $A$  корректора и, соответственно, параметры его настройки, корригируя упругую характеристику опоры подшипника и благодаря этому она пропускает лишь низкочастотную составляющую внешней нагрузки.

На рис.2 приведена принципиальная схема, а на рис.3 - вариант конструкции предложенной опоры подшипника высокоскоростного ротора.

Несущая система (Рис.2) представлена в виде несущей платформы 7 и упругого элемента 1, что связывает платформу 7 со стойкой 10. Регулятор состоит из  $n(n > 2)$  элементов регулирования, каждый из которых выполнен в виде инерционного ползуна 3, установленного на направляющий 4 и имеет упругую связь 5 с несущей платформой 7. Инерционный ползун 3 может дополнительно иметь упругую связь 6 со стойкой 10. Корректор жесткости, например, представленный в виде  $n$  упругих элементов 2,

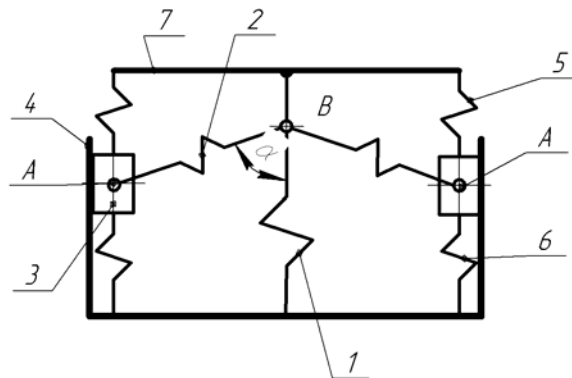


Рисунок 2 – Принципиальная схема опоры

расположенных наклонно и симметрично относительно упругого элемента 1 и таким образом, что линия действия элементов 2 (прямая  $AB$ ) составляет угол  $\alpha$  с линией действия упругого элемента 1.

Угол наклона  $\alpha$  выбирают при условии обеспечения расположения линии действия упругого элемента 2 в конусе трения системы «ползун-направляющая», то есть при условии  $\alpha > 90^\circ - \varphi$ , где  $\varphi = \arctg f$ ,  $f$  - коэффициент трения в зоне контакта ползуна 3 и направляющей 4. При изменении низкочастотной составляющей внешней нагрузки управление корректором, линия действия которого находится в конусе трения, образованного системой «ползун-направляющая», осуществляется путем изменения положения опорной точки  $A$  корректора за счет упругих элементов 5 и 6.

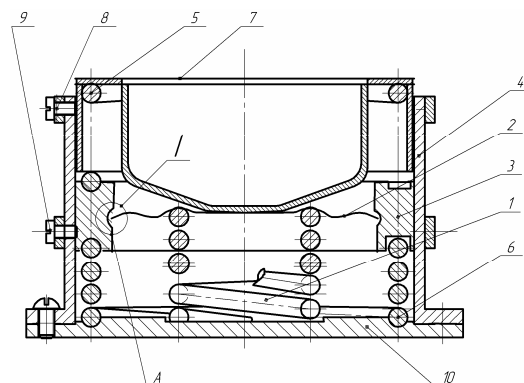


Рисунок 3 – Вариант конструкции и опоры подшипника

Настройка предложенной упругой опоры, осуществляется изменением параметров жесткости упругих элементов 1, 2, 5 и 6, массы инерционных ползунков,

исходного положения опорной точки  $A$ , исходного значения угла наклона  $\alpha$  и предварительной деформации упругих элементов 1, 2, 5 и 6 позволяет использовать упругую опору подшипников как низкочастотный механический фильтр.

На Рис.3 представлена, как вариант схемного решения, конструкция опоры подшипника, для случая,  $n \rightarrow \infty$ . В этом случае корректор, выполненный в виде упругой конической гофрированной оболочки 2, опирается на ползун 3 регулятора, который выполнен, например, в виде инерционного, разрезанного на несколько секторов кольца, расположенного в цилиндрической направляющей 4. Упругие элементы 5 и 6 регулятора, несущий упругий элемент 1 выполненные, например, в виде кольцевых пружин сжатия.

Установочные винты 8 и 9 используются при настройке и транспортировании опоры подшипника ротора.

Таким образом, рассматриваемая упругая опора подшипника ротора, эффективно решает задачу обеспечения управления динамической жесткостью скоростных роторных систем в заданном рабочем диапазоне кинематико-силовых характеристик. При этом устраняются противоречия между статической и динамической жесткостями, что обеспечивает необходимую несущую способность ротора. В итоге, это даёт возможность повысить технико-экономические показатели роторной системы.

### Выводы

Упругая опора подшипников ротора с управляемым изменением квазиулевого жесткости устраняет противоречия между статической и динамической жесткостями, обеспечивает необходимую несущую способность роторной системы для всего диапазона её рабочих частот. Рабочие скорости при этом располагаются в зоне самоцентрирования

**Список литературы:** 1. *Н.В. Григорьев* Нелинейные колебания элементов машин и сооружений. М.-Л., Машгиз, 1961.- 251 с. 2. *А.С. Кельзон, Ю.П. Циманский, В.И Яковлев* Динамика роторов в упругих опорах.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.-280 с. 3. *В.С.Гапонов, П.М. Калінін*. Пасивна віброзахисна система з керованою квазінульовою жорсткістю. Патент на винахід 62934 Україна – 2004. Бюл. № 1.