

УДК 621.9.011:517.962.1

## **КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАТОЧНОГО СТАНКА**

студенты гр. 103520 Карабанюк И.А.,

Щербаченя И.Е., Нефедова Т.А.,

*Научный руководитель - канд. техн. наук, доцент Довнар С.С.*

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В рамках университетского реновационного проекта исследованию был подвергнут классический инструментальный заточный станок. После ряда лет хорошей работы станок был выведен из эксплуатации для ремонта и переустановки на фундаменте. Непосредственно перед остановкой станок стал проявлять склонность к вибрациям на выбеге шлифовального шпинделя. Вероятно, по мере замедления шлифовальных кругов, станок проходил сверху вниз некоторые резонансные частоты.

Задача настоящей работы – провести виртуальные испытания станка в динамике, попытаться определить причины раскачки и дать необходимые рекомендации по реновации. В САД-пакете была построена 3D-модель станка. Проведен в два этапа динамический анализ методом конечных элементов (МКЭ). Первым этапом был модальный МКЭ-анализ – поиск резонансных мод (частот и собственных форм резонансных колебаний). На втором этапе (гармонический анализ) к станку прилагалась вращающаяся сила от дисбаланса шпинделя и круга. Сила прикладывалась в широком диапазоне частот с постоянным шагом. Так получалась амплитудная частотная характеристика станка (АЧХ). Она позволяет анализировать виброактивность машины.

На рис.1 а, б показан станок и, заодно, формы его модальных колебаний на первом и пятом резонансах. Станок включает в себя станину 1, два шлифовальных круга 2, почти симметричный шпиндель 3. Два шарикоподшипника 4 удерживают шпиндель в корпусах 5. Заточиваемый инструмент опирают на кронштейны 6. В базовом варианте МКЭ-анализа (БазВ) станина жестко зафиксирована в анкерных отверстиях 1 в нижнем опорном фланце. Корпус-

ные детали моделируются как серый чугун. Шпиндель является стальным. Подшипникам приписаны свойства модельного материала так, чтобы их радиальная и осевая жесткости составляли и соответственно.

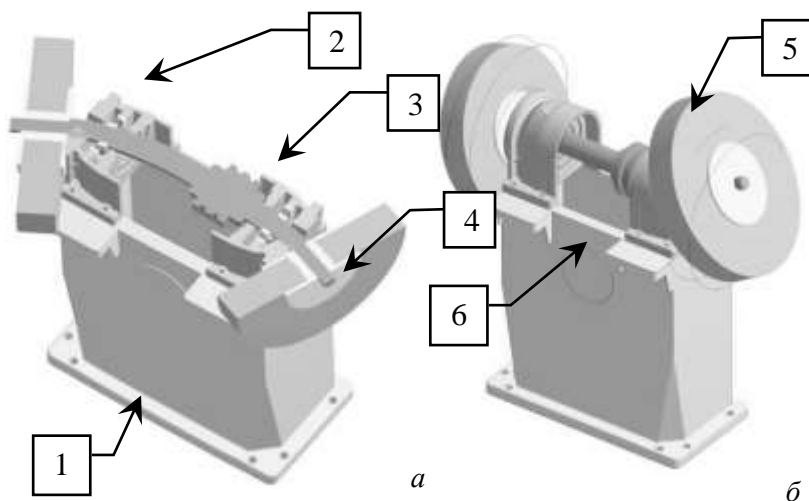


Рис.1. Резонансы заточного станка на частотах  $f_1 = 102,9$  Гц (а) и  $f_5 = 131,1$  Гц (б)

Рабочие частоты шпинделя станка лежат в диапазоне 27 – 40 Гц. Именно на этих частотах дисбаланс круга создает круговую силу (рис.2, а) пытающуюся возбудить станок. Однако машина была спроектирована правильно – её резонансные частоты лежат более, чем на октаву выше рабочих. Как показал модальный МКЭ-анализ, резонансы начинаются со 102 Гц. Все они связаны с колебаниями кругов и шпинделя в подшипниках. На первом резонансе (рис.1, а) круги движутся навстречу друг другу, а шпиндель изгибается в виде полуволны. На пятом резонансе (рис.1, б) круги колеблются плоскопараллельно друг другу, а шпиндель принимает вид одного периода синусоиды. На более высоких частотах резонансные моды связаны с мультиволновыми изгибами шпинделя. Такие колебания малоопасны – они обычно слабо возбуждаются и хорошо затухают в технологическом оборудовании.

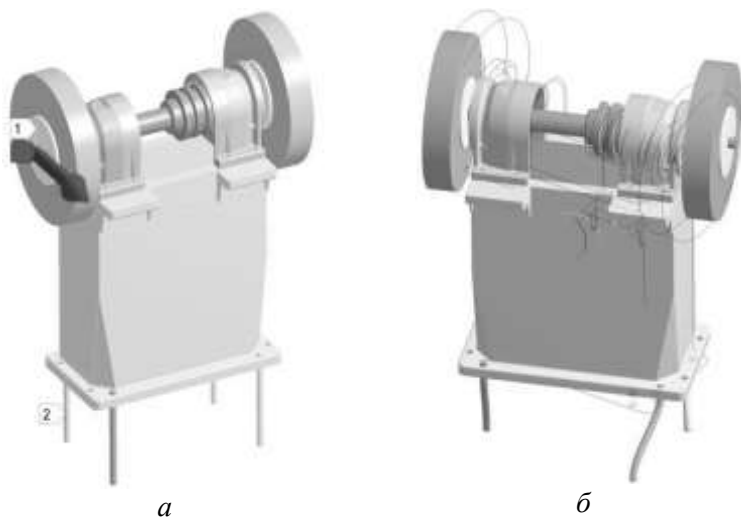


Рис.2. Приложение вращающейся силы (а) на круг (1) и резонансная раскачка под её действием (б) при анкерном базировании (2) станка

Таким образом, рабочие вынужденные колебания станка являются дорезонансными. Это видно на АЧХ (рис.3), где верхняя граница рабочих колебаний (маркер Р) находится слева, в статическом диапазоне (СТ). Намного правее лежат группой резонансные пики. Они образуют, диапазон общестаночных резонансов (ОСР). Это как раз те пять резонансных мод, которые упомянуты выше. Первая мода (рис.1,а) возбуждается сильнее всех. Правее ОСР склонность станка к раскачке опять падает. Там располагается зарезонансный диапазон (ЗР).

Кривая БазВ (пик 1) соответствует базовому варианту условий. Если вдвое понизить жесткость подшипников (до ), то (кривая Подш300) главный резонансный пик (2) сместится влево только на несколько герц и станет на 23% выше. Другой смоделированной МКЭ вариацией был виртуальный переход от чугунной станины к алюминиевой (кривая АлюмС, пик 3). Существенных изменений на АЧХ не произошло.

Сильное влияние на резонансную раскачку оказывают жесткость шпинделя. Если понизить её в 1,5 раза (условный переход от стального к чугунному шпинделю – кривая ШпиндЧ), то пик (4) сместится влево со 102 до 92 Гц и вырастет на 75%. Существенно влияет на динамику и второй круг. Если оставить на станке только круг, к которому приложена вращающаяся сила (кривая *1 Круг*), то соответствующий резонансный пик 5 тоже вырастет (на 61%). Интересно, что пик сместится по сравнению с *БазВ* уже вправо, до 108 Гц. В целом диапазон ОСР демонстрирует высокую стабильность. Все склонные к возбуждению резонансы лежат близко друг к другу. Связанный с ОСР подъем АЧХ (ОСР-всплеск) инертен по отношению к весьма сильным вариациям в состоянии станка.

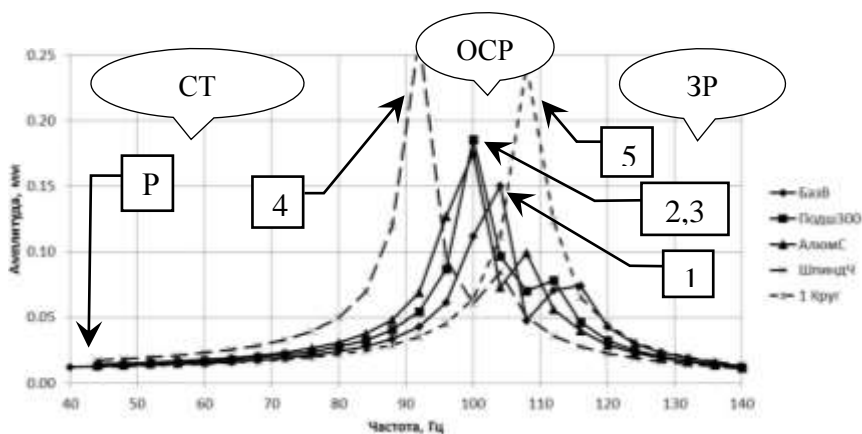


Рис.3. АЧХ станка при жестком закреплении станины и вариации его параметров

Перед выводом станка на ремонт были основания полагать, что жесткость его базирования нарушилась. Станок фиксируют 8 анкерных болтов, уходящих вглубь бетонного фундамента и залитых раствором. Исходно раствором была подлита и станина. Обследование показало, что между станиной и фундаментом из-за вибраций опять возник зазор. Кроме того, расшатались, анкерные болты.

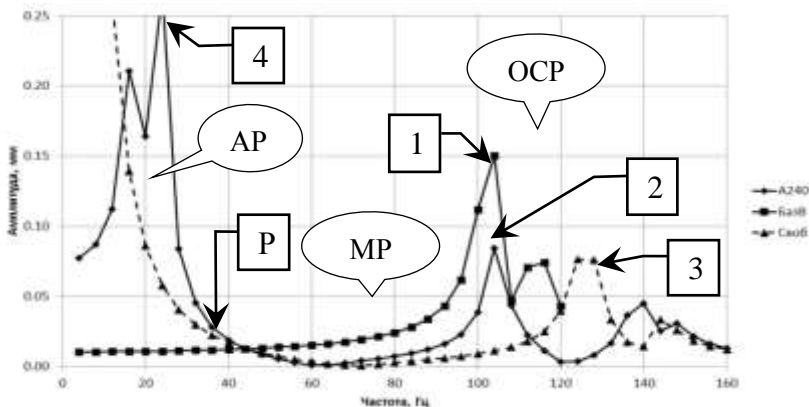


Рис.4. АЧХ станка при разных вариантах его базирования:  
*A240* – на анкерах длиной 240 мм;  
*БазВ* – базовое жесткое (совпадает с рис.3);  
*Своб* – виртуальное свободное (inertia relief)

Ситуация была воспроизведена путем 3D-моделирования. Перебирались разные возможные варианты сопряжения станка и фундамента. Был найден вариант *A240*, реалистично отражающий поведение станка (рис.2). Здесь станок опирается только на 4 анкера (2). Между каждым анкером и окружающим бетоном на 240 мм вглубь разбит зазор. Иначе, станок базируется на 4-х стержнях, податливых в поперечном направлении. Тогда на АЧХ (рис.4, кривая *A240*) возникает два подъема: вокруг пика 1 (это описанный выше ОСР-диапазон) и вокруг пика 4 на частотах 17 – 22 Гц. Этот низкочастотный эффект назовем АР-всплеском (анкерные резонансы). Здесь возбуждается сразу несколько низкочастотных резонансов. В них станок движется как жесткое тело, а деформируются, в основном, анкера. Один из резонансов иллюстрируется на рис.2, б. Станок совершает крутильные движения вокруг вертикальной оси. Пары анкеров работают подобно параллелограммной подвеске.

После выключения шпиндель замедляется (выбег) с частоты *P* (рис.4) и сразу же проходит справа налево АР-диапазон. Именно здесь наблюдаются сильные колебания станка (АР-всплеск). Получается, что АЧХ станка перед реновацией состоит из пяти участков: статического СТ-диапазона – АР-всплеска – «спокойного» межре-

зонансного диапазона МР – ОСР-всплеска – зарезонансного ЗР-диапазона.

Для кривой **A240** всплеск ОСР оказался ниже (маркер 2), чем аналогичный всплеск для базовой кривой **БазВ** (маркер 1). Следовательно, расшатанные анкера несколько смягчают главные, высокочастотные резонансы при работе вблизи ОСР. В этой связи был проделан виртуальный эксперимент: станок был полностью лишен опор (кривая **Своб** на рис.4). В МКЭ-анализе это режим называется “inertia relief” и применяется в случаях, когда приложенные гармонические силы балансируются только силами инерции. В реальности ситуация соответствует базированию машины на очень податливых опорах.

Слева на кривой **Своб** присутствуют ожидаемые большие перемещения. Зато общестаночные резонансы оказываются довольно слабыми (маркер 3) и вынесенными на более высокие частоты. Кроме того, во всем «спокойном» диапазоне МР кривая АЧХ в варианте **Своб** идет существенно ниже, чем в вариантах **БазВ** и **A240**. Отсюда вытекают конструктивные предложения по реновации.

1. Перейти к *скоростному шлифованию* и повысить частоту вращения шпинделя. Это может дать высокое качество затачиваемых поверхностей режущих инструментов.

2. Поднять рабочие частоты шпинделя именно в середину межрезонансного диапазона МР (рис.4), где они будут далеки от всех всплесков.

3. Снабдить станок мягкими компактными опорами (в духе линии **Своб**), например, на основе резинометаллических подушек.

4. Для ограничения больших колебаний на самых низких частотах (начало разгона и конец выбега) снабдить станок нелинейными гасителями типа ограничителей.

**Выводы.** У станка существует диапазон общестаночных резонансов (ОСР). Он лежит между 92 и 108 Гц и весьма стабилен к вариациям параметров станка. При жестком закреплении станка диапазон ОСР находится намного выше рабочих частот (27 – 40 Гц) и не угрожает резонансной раскачкой машины. Виброактивность станка можно понизить до 3-х раз переходом от жесткого закрепления на фундаменте к сверхмягким локальным опорам.