

ВИРТУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНОЙ ДИНАМИКИ КОЛОННЫ ТЯЖЕЛОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА

Довнар С.С.

Белорусский национальный технический университет

Предмет исследования. Работа посвящена важному классу точных машин – горизонтальным сверлильно-фрезерно-расточным станкам (СФР- станкам) с подвижной колонной (“Travelling column”; рис.1).

Станок обрабатывает массивные детали. Они обычно хорошо закреплены на неподвижной площадке и, соответственно, статичны. Основным динамическим объектом станка является колонна в сборе. Кроме подвижности колонны в продольном направлении X присутствует вертикальное (Y) перемещение тяжелой бабки по колонне. Сквозь бабку перемещается ползун с инструментальным шпинделем (в поперечном направлении Z). Переменная сила резания на инструменте оказывает возбуждающее действие на всю колонну.

Станки “Travelling column” выпускаются рядом производителей в мире, в том числе белорусской фирмой «МЗОР». Пропорции колонн примерно одинаковы. Колонна с усредненными современными габаритами смоделирована в работе.

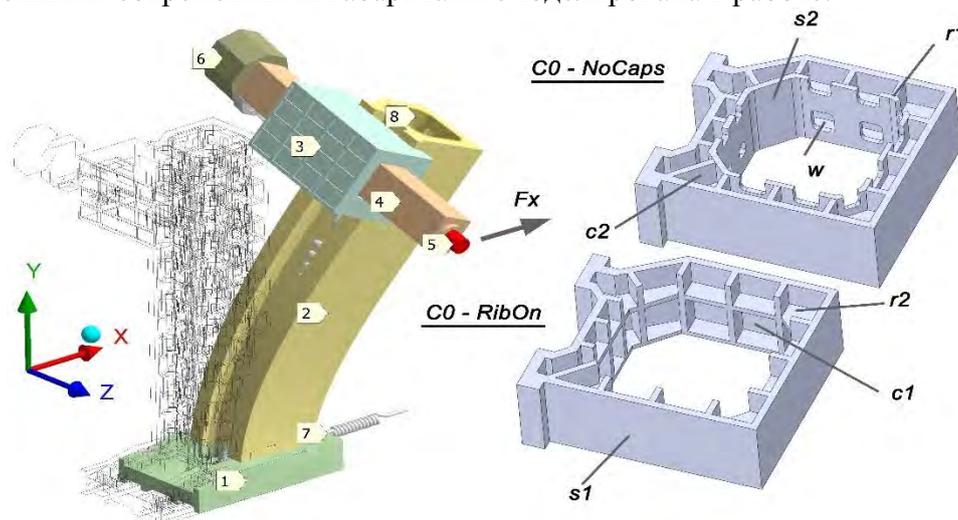


Рис.1. Резонансные изгибные колебания станочной колонны 2 на скользящих салазках 1 (мода $M1$; возбуждение силой $F_x = 1кН$ на частоте 17 Гц; $\times 20000$) и варианты поперечного сечения колонны C0-NoCaps (двойная стенка) и C0-RibOn (одинарная стенка): 3 – бабка; 4 – ползун; 5 – шпиндельный узел; 6 – главный двигатель; 7 – пружина-образ привода X; 8 – проем в колонне; s1 – наружная оболочка; s2 – внутренняя оболочка; r1, r2 – ребра; c1, c2 – открытый и закрытый кессоны; w – окно

Исследование связано с тенденцией - придавать subtilность колоннам. Отношение высоты колонны к габариту сечения растет и составляет не менее 4 – 5 раз. Это угрожает виброустойчивости станков, особенно, при подъеме инструментальных бабок к верху колонны. Тенденция к subtilности колонн обусловлена стремлением уменьшить подвижные массы в станке. При этом динамика subtilных колонн не изучена. Действия конструкторов интуитивны.

Постановка задачи и варьирование системы усиления. Инструментом исследования является виртуальное испытание станка методом конечных элементов (МКЭ)

[1]. Метод известен как точное и надежное средство моделирования. Имеется опыт применения МКЭ для оптимизации тяжелых станков [2-4]. МКЭ-анализ хорошо соответствует натурным экспериментам.

Направление работы – выяснить возможность усиления субтильной колонны без изменения её пропорций, за счет внутренних конструктивных элементов. Всегда предполагается (рис.1) наличие внутри наружной оболочки (стенки) $s1$ колонны системы вертикальных и горизонтальных ребер ($ribs$) $r1, r2$. Ребра образуют кессоны $c1$ – прямоугольные ячейки с примерно одинаковыми сторонами. Характерный размер – 250 мм, толщина стенки – 35 мм, толщина ребра ~25-30 мм. Это – *минимальный* вариант усиления $C0-RibOn$ с *одинарной* стенкой.

Моделируются еще две сочетаемые методики усиления – создание внутренней оболочки (стенки) $s2$ и заполнение кессонов бетоном (полимербетоном). Внутренняя стенка $s2$ (25 мм) рассматривается единой с наружной $s1$. Например, это цельная чугунная отливка. Можно говорить о появлении у колонны двойной стенки ($C0-NoCaps$ на рис.1). Внутри нее расположены закрытые кессоны $c2$. Толщина двойной стенки в работе – 155 мм при габарите сечения 1 м и высоте колонны 4,5 м.

Применение двойной стенки в отливках станков известно. Заполнение кессонов бетоном является новым предложением. До сих пор бетон применялся в станкостроении только для полной заливки корпусов [5]. В случае подвижной колонны это ведет к нерациональному увеличению массы. Бетон, попадающий в проем колонны (8 на рис.1 и hl на рис.2), не работает ни на изгиб, ни на кручение. В кессонах $c1, c2$ бетон образует открытые и закрытые вкладыши ($i1, i2$ на рис.2).

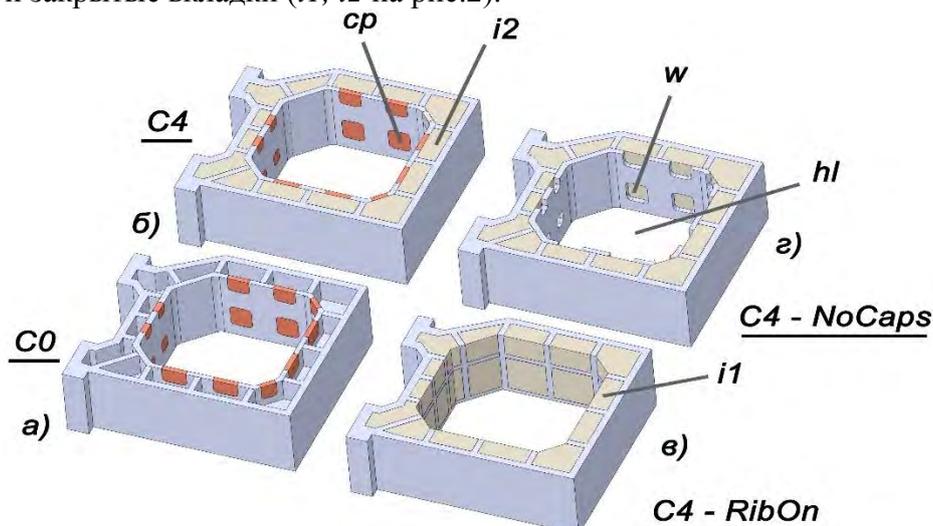


Рис.2. Варианты усиления колонны (поперечное сечение): а – C0; б – C4; в – C4-RibOn; г – C4-NoCaps

Обратим внимание на внутренние окна w (рис.1, 2). Они нужны по технологическим соображениям при литье колонны. Окна можно заделать крышками cp ($caps$) и получить цельную двойную стенку колонны. Постановка крышек связана с трудоемкой обработкой внутри колонны. Поэтому нужно оценить существенность вклада крышек в жесткость колонны.

Базовым вариантом является колонна с *двойной стенкой* и закрытыми окнами. Это случаи на рис.2 а, б. Маркер $C0$ обозначает колонну с пустотелыми кессонами, а маркер $C4$ – с бетонными вкладышами. Вариант $C4$ будем называть далее *максимальным* усилением. В отсутствие крышек на внутренней оболочке возможны случаи с бетонированием кессонов ($C4-NoCaps$, рис.2, в) и с пустыми кессонами ($C0-NoCaps$, рис.1, б). Если внутренней оболочки нет, то это случаи ($C4-RibOn$, рис.2, г) и ($C0-RibOn$, рис.1).

Описанные варианты колонны сведены в табл.1. Здесь же указаны статические жесткости на шпинделе в направлении X . Минимальному усилению с одинарной стенкой и внутренними ребрами *C0-RibOn* соответствует самая низкая жесткость 53,8 Н/мкм. Наиболее жесткой является структура двойной стенки с закрытыми окнами и забетонированными кессонами *C4*. Однако, в статике эти варианты различаются умеренно – только в 1,45 раза.

Таблица 1 – Варианты усиления колонны и соответствующая статическая жесткость на шпинделе (по X ; Н/мкм; МКЭ-расчет)

	Только оребрение наружной оболочки (RibOn)	Двойная стенка без крышек внутри (NoCaps)	Двойная стенка с запирающими кессонами крышками
Пустые кессоны – C0	<i>C0-RibOn</i> 53,8	<i>C0-NoCaps</i> 60,8	<i>C0</i> 66,1
Бетон в кессонах - C4	<i>C4-RibOn</i> 69,5	<i>C4-NoCaps</i> 75,1	<i>C4</i> 78,3
Рост жесткости	29,2%	23,5%	18,5%

В отсутствие бетона переход от одинарной к двойной стенке дает выигрыш в жесткости только в 22,9%. При условии бетонирования кессонов рост жесткости еще меньше – 12,7%. Сама процедура бетонирования кессонов повышает жесткость колонны только от 18,5 до 29,2% (последняя строка табл.1). Следовательно, все меры усиления являются скромными в смысле статической жесткости. Надо проанализировать динамическую жесткость колонны.

По литературным данным [6], точное и устойчивое резание требует на вершине инструмента (в данном случае ~ на торце шпинделя) жесткости не менее 20 Н/мкм как в статике, так и в динамике. При динамической жесткости ниже 10 Н/мкм становится вероятным возбуждение автоколебаний (из зоны резания). При жесткости ниже 5 Н/мкм грубые автоколебания почти неизбежны.

Особенности виртуальных испытаний и строение МКЭ-модели. В работе основное внимание уделено крутильной динамике. Кручение колонн и стоек являются основной проблемой для точности обработки и устойчивости резания.

Резонансное кручение колонны опасно из-за ползуна. В среднем положении (по Z) ползун инерционен и подобен коромыслу (двигатель и шпиндельный узел разнесены в разные стороны от оси колонны). Колонна выполняет роль торсионной пружины. Самый опасный случай – бабка с ползуном в верхнем положении.

Испытующую силу будем прикладывать к шпинделю в направлении X . Это максимально эффективно для возбуждения крутильных колебаний. К тому же, деформация по X наиболее опасна для точности станка.

Салазки удерживаются по X пружиной с жесткостью 400 Н/мкм (7 на рис.1. а). Это образ продольного привода. Аналогично, в вертикальном направлении Y бабку поддерживают две пружины (сверху и снизу) жесткостью по 300 Н/мкм. Поперечная (Z) пружина под ползуном имеет жесткость 400 Н/мкм.

Материалом корпусных деталей (колонны, салазки, ползун) принят чугун с модулем упругости $E_c = 130 \text{ ГПа}$. Различия между бетоном и полимербетоном не моделируются. Обобщенный бетон в кессонах имеет средний модуль упругости $E_o = 30 \text{ ГПа}$. Остальные детали – с модулем упругости стали $E_{cm} = 200 \text{ ГПа}$. По литературным данным для бетона, чугуна и стали установлены коэффициенты демпфирования ξ , равные соответственно 3%, 2% и 1%.

Направляющие по осям X, Y, Z приняты гидростатическими. Это дорогое, но точное и жесткое решение. Трение между подвижными частями практически исчезает. Гидростатические сопряжения моделируются контактными парами в статусе *no separation* (свободное скольжение без отрыва). Остальные детали модели скреплены контактными элементами в статусе *bonded* (заблокировано). В гидростатических направляющих может быть предусмотрен режим гидрозажима, когда скольжение отсутствует. В данной работе это сделано один раз, на салазках, для блокировки всей колонны в сборе (вариант *C4-Fix*).

Картина резонансов колонны в сборе. Модальный МКЭ-анализ станка был проведен для частот до 100 Гц. Рассмотрим те резонансные моды, в которых доминирует движение по X (продольно) для шпинделя. В диапазоне до 60 Гц обнаружено три таких моды – изгибная мода *M1* (рис.1) и связанные крутильные моды *M2a* и *M2b* (рис.3 слева и справа соответственно).

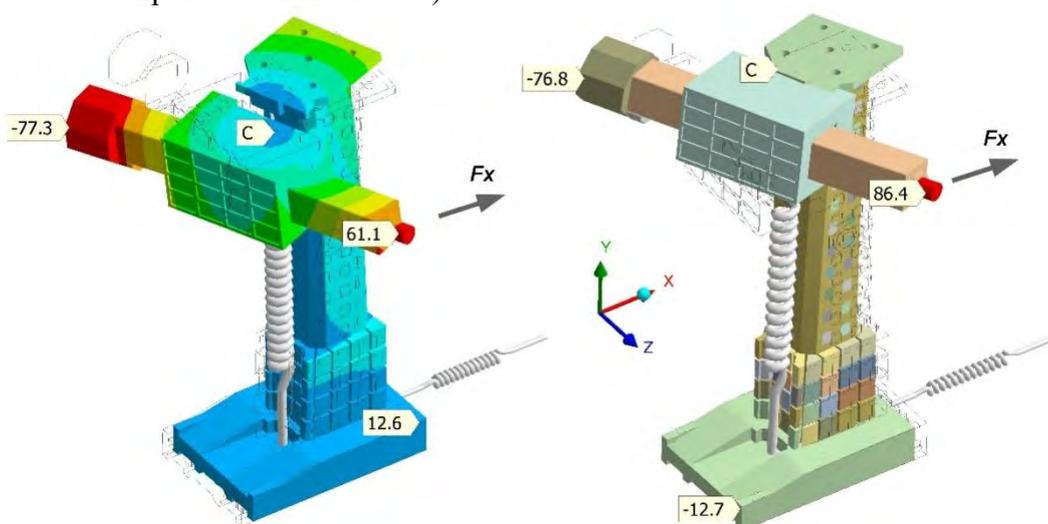


Рис. 3. Возбуждение крутильных резонансов *M2a* (слева; 40 Гц) и *M2b* (справа; 42,5 Гц). Суммарные перемещения в мкм, $\times 12000$. Гармоническая сила на шпинделе F_x с амплитудой 1 кН

Формы мод соответствуют классическим случаям изгибных и крутильных резонансов консольно-закрепленного стержня с массой на свободном конце. Кручение происходит вокруг вертикальной линии, проходящей возле маркера С. Концы ползуна движутся в противоположных направлениях. Для салазок есть два варианта. Они могут скользить синфазно со шпинделем (61,1 и 12,6 мкм) или антифазно (86,4 и -12,7 мкм). Это и есть различие между модами *M2a* и *M2b*.

Базовая форма АЧХ станка. В ходе гармонического МКЭ-анализа построение АЧХ производилось с помощью силы амплитудой 1 кН, действующей в направлении X на торец шпинделя. Сила моделирует соответствующую компоненту резания, например, на фрезе или расточной оправке. Частота осцилляции силы наращивалась шагами в диапазоне от 0 до 60 Н. Для крупных станков в данный интервал попадают практически все общестаночные резонансы. Шаг изменения частоты – 1 Гц. В районе резонансных пиков шаг уменьшался до 0,5 Гц. На практике осциллирующую силу создают зубья инструмента.

На рис.4 АЧХ станка представлена для *максимального* варианта усиления колонны *C4* в случаях подвижных и зафиксированных салазок (*C4-Fix*). В интервале 15 – 25 Гц видны пики изгибного резонанса колонны *M1*. На 40 – 50 Гц наблюдаются пики крутильных резонансов. Для фиксированных салазок есть только один резонанс – по *M2*. Для подвижной колонны график зафиксировал возбуждение резонанса *M2b*. Мода *M2a* здесь почти не проявляет себя.

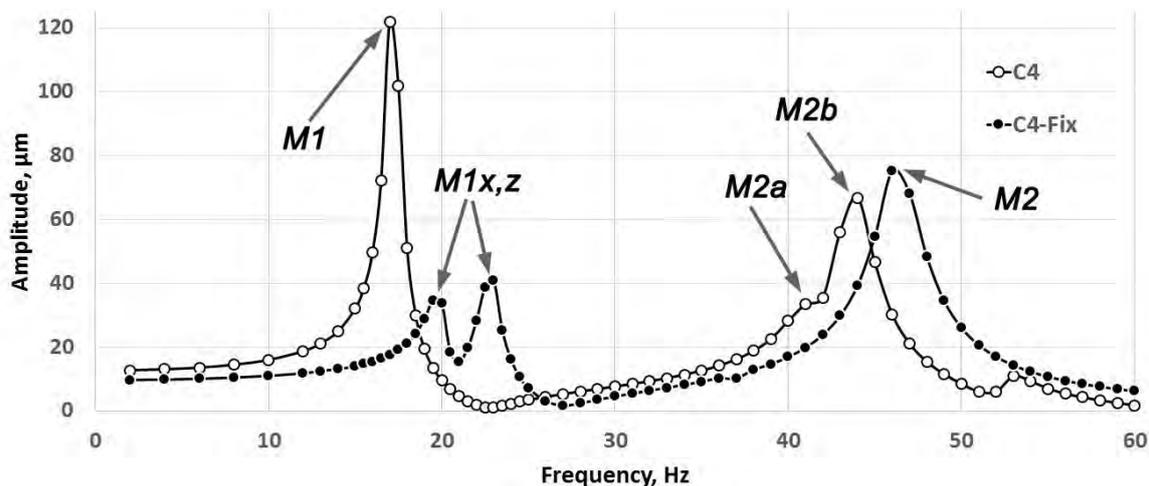


Рис. 4. АЧХ шпинделя в продольном направлении X для случаев подвижной ($C4$) и зафиксированной на салазках колонны ($C4-Fix$). Вход АЧХ – сила 1 кН по X ; выход – амплитуда колебания вдоль X

Видно, что крутильная динамика зафиксированной и подвижной колонн практически одинакова. Не обнаруживается существенного различия ни по высоте, ни по частоте резонансных пиков. Следовательно, управление салазками по X мало влияет на опасные крутильные колебания колонны станка. Одновременно, фиксация салазок хорошо подавляет изгибной пик $M1$. Его высота падает примерно втрое. Появление невысокого двойного пика для $C4-Fix$ на частотах $19 - 24$ Гц связано с кроссингом изгибных резонансов колонн в направления X и Z .

Анализ вариантов внутреннего усиления колонны станка. Далее рассматривается динамика колонны при условии подвижности салазок. На рис.5 представлены АЧХ для разных вариантов усиления именно отливки колонны. Бетонирование кессонов отсутствует (исключая кривую $C4$). Очевидно, что для низкочастотного изгибного резонанса $M1$ система усиления не играет большой роли. Соответствующие пики высоки и почти накладываются друг на друга на частоте ~ 17 Гц. Динамическая жесткость на резонансе $M1$ во всех случаях не превышает 8 Н/мкм , что недостаточно для точного и устойчивого резания.

Тем не менее, резонанс $M1$ умеренно опасен для станка при правильной настройке системы ЧПУ. Резонансные колебания можно уравновесить подачей противофазного воздействия через двигатель привода.

Большую опасность представляют крутильные колебания по $M2$. Им не может противодействовать ни один из приводов станка. Здесь и обнаруживается различие между *минимальным* вариантом усиления $C0-RibOn$ и *максимальным* $C4$. Частота резонанса поднимается от 35 Гц до 44 Гц. Высота резонансного пика падает для $C4$ в $1,9$ раза. Обеспечивается динамическая жесткость $14,9\text{ Н/мкм}$. Это дает поле для маневра и обеспечивает некоторую гарантию от наступления регенеративных автоколебаний при резании.

Для $C0-RibOn$ резонансный пик на рис.5 создан модой $M2a$. В случае $C4$ эта мода не проявляет себя. Происходит переключение на связанную моду $M2b$. Для промежуточного структурного варианта $C0$ (двойная стена без бетона) возбуждаются обе моды. Поэтому АЧХ имеет двойной пик. Сравнение вариантов $C0-NoCaps$ и $C0$ отдает предпочтение второму варианту. Следовательно, крышки, дающие цельность внутренней стенке, играют в крутильной динамике положительную роль. Их постановка оправдана.

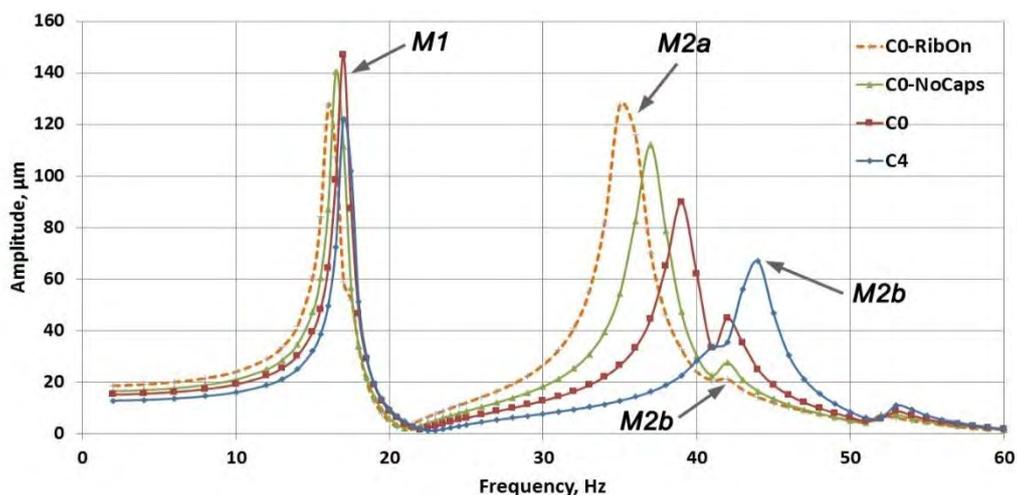


Рис. 5. АЧХ колонны по X для различных случаев исполнения отливки колонны

Итак, в динамике в условиях кручения структурное усиление по типу «двойная стенка + бетонирование кессонов» гораздо эффективнее, чем в статике.

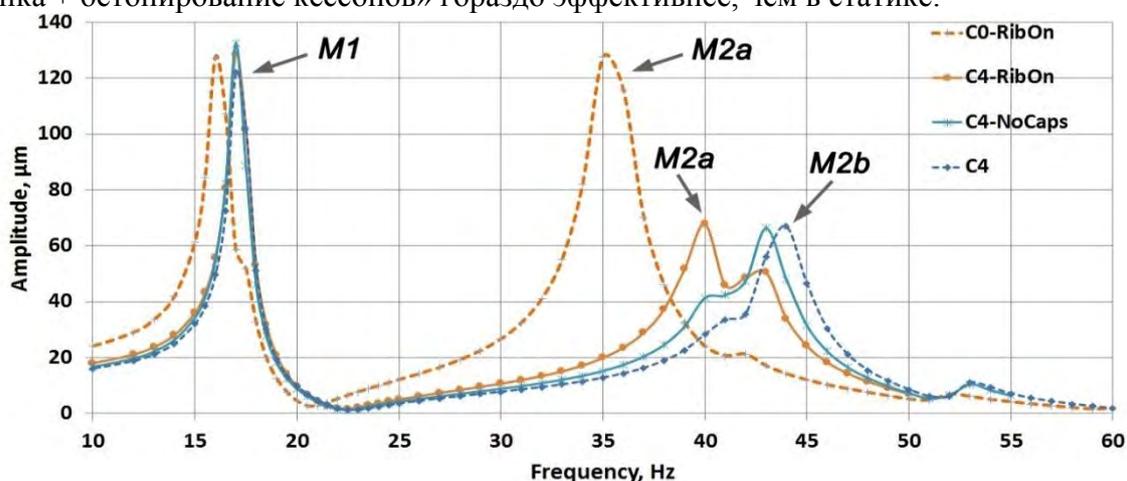


Рис. 6. АЧХ колонны по X для различных случаев усиления при условии бетонирования кессонов

На рис.6 сопоставлены варианты усиления, в которых кессоны заполнены бетоном. Кривая *C0-RibOn* дана для сопоставления. Применение бетона почти не влияет на изгибной резонансный пик *M1*. Его высота и положение по оси абсцисс остаются вполне стабильными. Однако, бетонирование делает крутильную динамику колонны менее опасной для точности резания. Вдвое падают высоты пиков типа “*C4*”. Частоты крутильных резонансов смещаются вверх на 5 – 10 Гц. Поэтому бетонирование кессонов может быть рекомендовано для практики.

На рис.6 вновь (как и на рис.5) видно переключение возбуждения между модами типа *M2*. При умеренном внутреннем усилении по вариантам *C0-RibOn* и *C4-RibOn* возбуждается нижняя крутильная мода *M2a*. Существенное усиление двойной стенкой (варианты *C4-NoCaps* и *C4*) делает активной верхнюю моду *M2b*.

Выводы по результатам виртуальных испытаний станка:

1. Для гидростатических направляющих наблюдается пара связанных крутильных резонансов колонны по модам *M2a* (35 – 40 Гц) и *M2b* (42 – 44 Гц). Им соответствует синфазность и антифазность колебаний шпинделя и салазок.
2. При минимальном внутреннем усилении колонны (*C0-RibOn* «одинарная стенка и открытые кессоны») возбуждается только низкочастотный резонанс *M2a*. При максимальном усилении (*C4* «двойная стенка и бетонирование закрытых кессонов») возбуждается только высокочастотный резонанс *M2b*.

3. Промежуточные варианты усиления не рекомендуются из-за возбуждения обоих мод. На АЧХ появляется двойной пик, который трудно обойти.
4. Фиксация салазок почти не воздействует на крутильную динамику колонны.
5. Низкочастотный изгибной резонанс колонны **M1** (~17 Гц) не чувствителен к варианту внутреннего усиления. Его ограничивает фиксация салазок.
6. Применение двойной стенки является эффективным приемом усиления колонны против кручения. Окна на внутренней стенке следует перекрывать.
7. В отсутствие бетонирования рекомендуемый вариант усиления колонны – **C0** – «двойная стенка с закрытыми окнами». По сравнению с минимальной структурой **C0-RibOn** резонанс смещается вверх на 5 Гц и ослабевает в 1,5 раза.
8. Показана эффективность подповерхностного бетонирования колонны – только в кессонах. Заливка сердцевины не нужна. Усиление по **C4** переключает возбуждение с моды **M2a** на **M2b**. Пик резонанса уменьшается вдвое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
2. Туромша, В.И. Баланс жесткости фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки / В.И.Туромша, С.С.Довнар, А.С.Трусковский, И.И.Шумский. // Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого. №3 (50), 2012, с.19-29.
3. Василевич, Ю.В. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ / Ю.В.Василевич, С.С.Довнар, И.И.Шумский // Наука и техника. 2014. - № 4 . С.14 - 24.
4. Василевич, Ю.В. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой / Ю.В.Василевич, С.С.Довнар, А.С.Трусковский, И.И.Шумский // Наука и техника. 2015. - № 3. С. 9 - 19.
5. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М.И.Браиловский, А.Г.Воскобойник, А.А.Воскобойник. – Коломна, Воентехиздат. – 2010. – 76 с.
6. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.