

7. С.С. Довнар, А.М.Якимович, И.Л.Ковалева, И.И.Шумский. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. - №11 . С. 25-36.
8. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stépán G., Govekar E., Grabec I. Stability prediction for milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(7-8), pp. 769-781.
9. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding, Keynote paper, 2004. Annals of the CIRP 53/2: pp. 619–652.
10. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов – Мн.: Выш. шк. 1991. – 382 с.
11. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
12. Василевич Ю.В., Довнар С.С., Трусковский А.С. МКЭ-анализ гармонического возбуждения горизонтального фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричной стойкой // Машиностроение. 2014. - № 28 . С.112 – 120.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С., Сокоров И.О., Трусковский А.С., Шумский И.И., Карабанюк И.А.

**МКЭ-АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПОРТАЛА
НА ДИНАМИКУ ПОРТАЛЬНОГО СТАНКА**

Белорусский национальный технический университет,

ОАО «МЗОР» - Управляющая компания холдинга «Белстанкоинструмент»

Минск, Беларусь

С помощью МКЭ проведен статический, модальный и гармонический анализ портала тяжелого станка. Портал рассмотрен в зафиксированном и подвижном состоянии, а также пустым и заполненным бетоном. Выявлены три резонансные моды, угрожающие динамическому качеству портала. Эти моды М1, М2, М3 занимают диапазон от 20 до 90 Гц. Сильнее всего они возбуждаются в пустом подвижном портале. Режимы резания придется приспособлять к межрезонансной и зарезонансной обработке. Заполнение бетоном подвижного портала не рекомендуется, так как не достигается продольная жесткость.

Резонансная мода М1 «Клевки портала» сдерживается переходом от подвижного к фиксированному portalу. Мода М2 «Параллелограмм» ограничивается заполнением портала бетоном. Для сдерживания моды М3 «Клевки траверсы» ключевым действием является заполнение бетоном именно траверсы.

Для тяжелого прерывистого резания рекомендуется сочетание фиксации портала и заполнение его бетоном. Статическая жесткость поднимается более, чем в 3 раза. Возрастают в 1,6 – 1,9 раз все резонансные частоты. Резонансные амплитуды падают не менее, чем в 4,7 раз. АЧХ становится более пологой по всем осям. Эффект достигается даже при слабой демпфирующей способности бетона. Для фиксированного портала заполнение траверсы не создает динамических проблем. Утяжеление высоко расположенной траверсы компенсируется дополнительной жесткостью бетона в колоннах портала.

Предмет исследования.

Важной разновидностью тяжелых станков являются порталные станки. Они имеют несущую систему в виде П-образной рамы – портала. Обычно портал несет на своей траверсе (поперечине) и колоннах суппорта с инструментами. Портал охватывает стол с обрабатываемой деталью.

Примером порталных станков являются продольно-фрезерные станки ОАО «МЗОР» [1]. Порталы выполняют в неподвижном (классическом) варианте и в варианте с продольной подвижностью («Гентри»). Изготавливают порталы из чугунных пустотелых отливок. Стоит вопрос, допустимо ли заполнять пустоты бетонными смесями. Это известное средство ослабления вибраций станков [2, 3]. Однако бетоном заполняют обычно низкорасположенные станины. Портал же является высокорасположенной конструкцией, что может дать

неожиданные колебательные эффекты. Натурные эксперименты пока отсутствуют из-за их дороговизны. В данной работе производится виртуальное испытание портала с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [4].

МКЭ-моделирование неоднократно применялось для различных тяжелых станков ОАО «МЗОР» и показало хорошее соответствие натурным испытаниям [5-11]. Целью работы является улучшение динамического качества портала. Здесь для самых разных несущих систем станков типовыми задачами являются [12]:

- подъем общестаночных резонансных частот, вывод их из самой опасной низкочастотной области (для тяжелых станков обычно выше 20-30 Гц);
- отстройка резонансов станка от его типичных рабочих частот (например, колебаний сил резания в базовых вариантах обработки);
- ослабление степени возбуждаемости резонансов станка рабочими силами, например, силами резания.

Для поиска варианта портала с хорошим динамическим качеством в данной работе варьируются два фактора:

- портал подвижен или неподвижен;
- портал внутри пуст или заполнен бетонным составом.

Геометрическая модель портала и её конструктивные варианты.

Для моделирования использована геометрическая модель портала станка МС620 – базовой модели продольно-фрезерных и специальных станков МЗОР. Пустотелый чугунный портал подвергался ранее конечно-элементным исследованиям [5-8]. На рис. 1. показаны полости порталных деталей, виртуально заполненные бетоном. Чугунные корпуса охватывают бетонные блоки снаружи и имеют относительно малую толщину стенок 16-25 мм. Корпуса можно увидеть, например, на рис. 2. Модельный инструмент 1 (рис. 1.) закреплен в шпиндельном узле в ползуне 2. Ползун может перемещаться вертикально (по оси Z). Однако в рамках данной работы он зафиксирован в суппорте 3, который находится на траверсе 4. Траверса позволяет суппорту перемещаться поперечно (по оси Y). Траверсу удерживают две колонны 5. Колонны жестко закреплены на сани 6.

Далее возможны два варианта устройства портала. В первом случае сани 6 могут скользить продольно (по оси X) на опорах качения 7 по рельсам 8. Этот вариант будем обозначать буквой S (sliding). Он соответствует подвижным порталам системы «Гентри» для продольно-фрезерных станков.

Во втором случае рельсовая система отсутствует. Сани просто крепятся на фундаменте. Этот вариант будем обозначать буквой F (fixed). Он характерен для классических порталных станков.

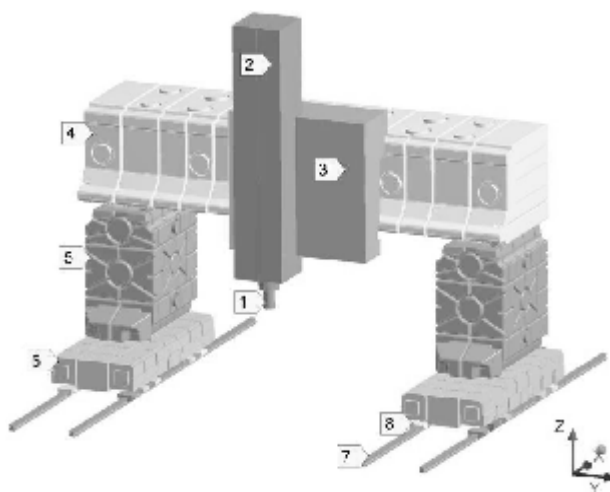


Рис. 1. – Компоновка портала продольно-фрезерного станка и его бетонное наполнение (чугунные корпуса не показаны)

В данной работе будут виртуально испытываться пустые порталы (E – empty) и такие же по геометрии порталы, но заполненные внутри модельным бетоном (C – concrete). Всего для моделирования выбрано четыре конструктивных варианта портала.

1. SE – пустой чугунный портал, подвижный по X («Гентри», выпускается).
2. FE – пустой чугунный портал, фиксированный под санями («классика», выпускается).
3. SC – портал, заполненный бетоном и подвижный по X (не реализован).
4. FC – неподвижный заполненный бетоном портал (не реализован).

Параметры моделирования.

Материалами для виртуальных испытаний являлись чугун, сталь и обобщенный, модельный бетон (табл.. Параметры материалов взяты такими же, как в серии предыдущих работ [5-11].

Обобщенный модельный бетон отражает поведение как строительного бетона, так и полимербетона. Оба материала применяют для заполнения полостей станков. Их механические свойства варьируются в пересекающихся диапазонах. Особенностью настоящей работы является назначение бетону заведомо невысокого уровня демпфирования. Он взят таким же, как у чугуна $\xi_{\sigma} = \xi_{\epsilon} = 2\%$. Считаем нужным выявить сначала влияние на портал упругости и массы бетона. Повышенное демпфирование можно рассматривать как дополнительный положительный эффект.

Таблица 1 – Механические свойства моделируемых материалов

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Удельная плотность ,	Коэффициент демпфирования ξ
Чугун	110	0,28	7200	2%
Обобщенный модельный бетон	30	0,18	2300	2%
Сталь	200	0,3	7850	1%

Ширина портала в проеме составляет 3200 мм, а высота – 1860 мм.

Масса суппорта и ползуна вместе равны 4410 кг. Чугунный портал в пустом состоянии имеет массу 16780 кг. Бетонное наполнение траверсы, колонн и саней увеличивает массу портала на 18490 кг. Полная масса портала в варианте SC составляет 41720 кг. В ней чугунная несущая система портала обладает только 40,2% по весу.

В подвижных вариантах SE , SC на обоих санях установлены продольные привода. Обычно это безззорные зубчато-реечные системы REDEX [13]. Они смоделированы пружинами. Жесткость каждой пружины по каталогу установлена равной 600 Н/мкм.

Под санями смоделировано по 10 опор качения. Вертикальная жесткость каждой опоры установлена равной 3000 Н/мкм согласно соответствующему каталогу.

Все корпусные детали портала сцеплены друг с другом контактными конечными элементами, установленными в статус “bonded”. Суппорт и ползун также схвачены друг с другом и с траверсой. Жесткость монолитного ползуна специально повышена средствами МКЭ-пакета, чтобы лучше выявлять статические и динамические деформации других элементов портала.

Предполагается идеальное сцепление чугунных отливок и модельного бетона по всем внутренним поверхностям. Задано облегание бетоном внутреннего оребрения корпусов.

Статический МКЭ-анализ портала.

Подвижный портал, заполненный бетоном, уже анализировался методом конечных элементов на действие статических сил [5]. В данной работе шпиндель портала был нагружен по осям X , Y , Z тестовыми силами величиной по 100Н. В рамках линейной МКЭ-модели по происшедшим перемещениям были вычислены статические жесткости по соответствующим осям (табл..

Таблица 2 – Статическая жесткость (Н/мкм) портала для разных вариантов

Жесткость по направлениям	Конструктивный вариант			
	<i>SE</i>	<i>FE</i>	<i>SC</i>	<i>FC</i>
Продольно	386	599	714	1968
Поперечно	440	591	961	1748
Вертикально	418	448	1162	1298
Средняя жесткость	415	546	946	1671

Анализируя табл.2 и исходя из средней по осям жесткости, можно сделать следующие наблюдения.

Самую высокую статическую жесткость обеспечивает неподвижный заполненный портал (*FC*). Здесь средняя жесткость в 4,03 раза больше, чем для пустого подвижного портала (*SE*).

Разность между пустотелыми вариантами *SE* и *FE* с точки зрения статической жесткости невелика (1,31 раза).

Средняя жесткость в вариантах с бетоном в 2,72 раза больше, чем при его отсутствии.

Средняя жесткость в вариантах с фиксацией в 1,62 раза больше, чем при подвижном портале.

В обоих зафиксированных вариантах (*FE* и *FC*) жесткости по *X* и *Y* близки друг к другу (положительно для точности обработки), а жесткость по *Z* им уступает. Жесткости по разным осям наиболее близки для варианта *SE* («Гентри»). Правда, это достигается на весьма низком уровне.

Продольная жесткость шпинделя для вариантов *SE*, *SC* (386 и 714 Н/мкм соответственно) намного меньше уровня 1200 Н/мкм, задаваемого жесткостью двух продольных приводов. Следовательно, жесткость приводов достаточна. Её увеличение не повлияет на податливость портала.

Модальный МКЭ-анализ и ведущие моды портала.

Конечно-элементный анализ выявил несколько резонансных мод (сочетаний частоты и формы собственных колебаний), охватывающих весь портал. Это так называемые общестаночные моды. Моды оказались практически одинаковыми для всех конструктивных вариантов портала. На рис. 2. три нижние моды даны для варианта *FE*.

Мода *M1* «Клевки портала» (рис.2. а) заключается в продольных раскачиваниях системы. Колонны, траверса и суппорт совместно вынуждают шпиндель совершать клевковые движения. Мода *M2* «Параллелограмм» (рис.2. б) является поперечной. При её возбуждении портал пытается заваливаться налево и направо. Это напоминает складывание параллелограмма, лишённого треугольных связей.

Характерные резонансные частоты мод *M1* и *M2* (табл. – приблизительно от 23 до 50 Гц в зависимости от структурного варианта. На более высоких частотах – примерно от 50 до 90 Гц – наблюдается еще одна клевковая мода – *M3* «Клевки ползуна» (рис.2. в). Точнее, это две близко расположенные моды *M3/M4*. Они связаны тем, что деформируется, в основном, траверса. Деформация является смещением прогиба, перекоса и закручивания. В результате, в резонансе ползун кажется клюющим и совершающим вертикальные прыжки в плоскости *XZ*.

На частотах выше 80 Гц у портала наблюдается самая верхняя из общестаночных мод – *M5* «Закручивание ползуна». Здесь ползун совершает почти чистое крутильное движение вокруг оси траверсы. Траверса выступает в роли своеобразного торсиона.

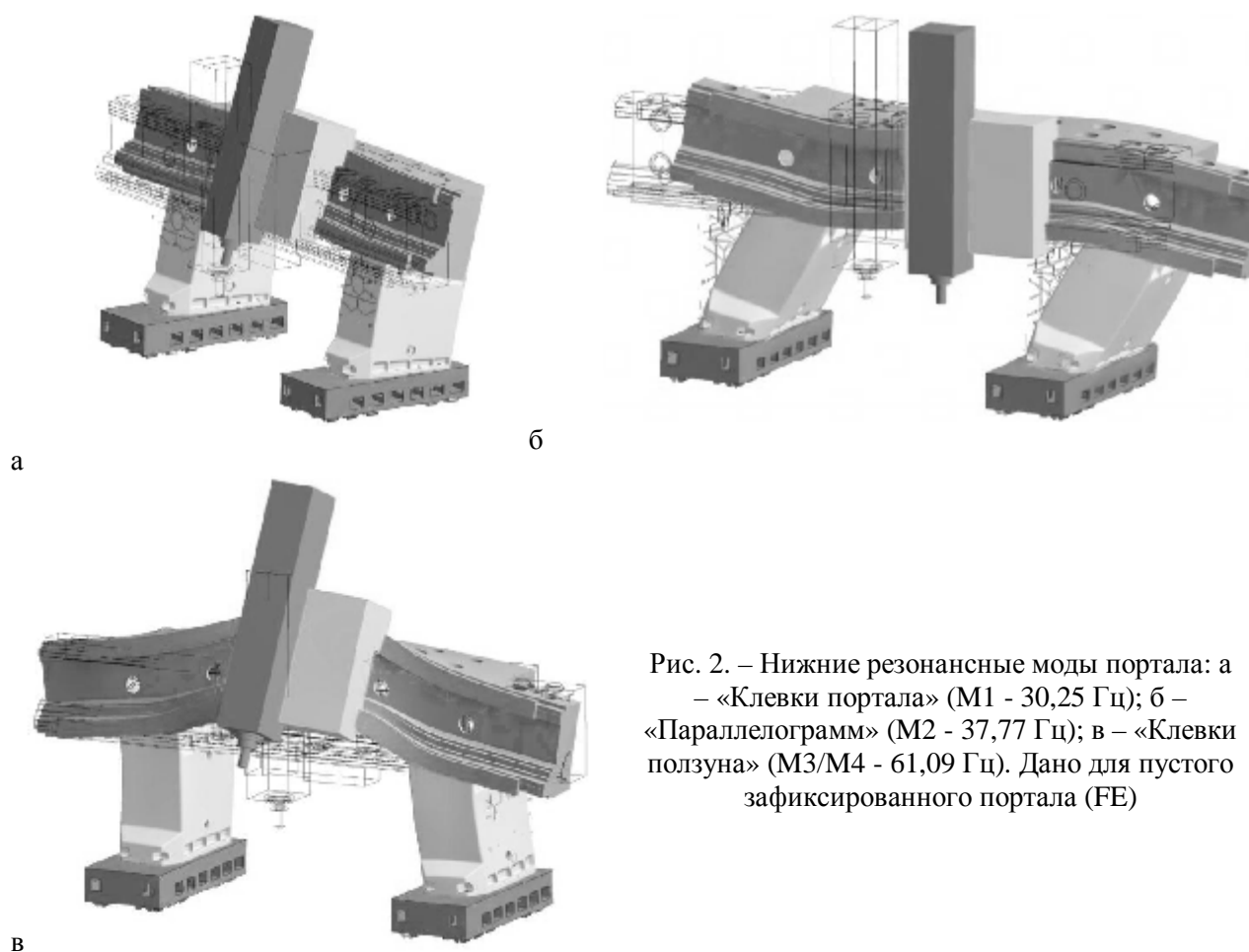


Рис. 2. – Нижние резонансные моды портала: а – «Клевки портала» ($M1$ - 30,25 Гц); б – «Параллелограмм» ($M2$ - 37,77 Гц); в – «Клевки ползуна» ($M3/M4$ - 61,09 Гц). Дано для пустого зафиксированного портала (FE)

Таблица 3 – Резонансные частоты портала для разных конструктивных вариантов

Мода	Вариант исполнения портала			
	<i>SE</i> (подвижный пустой)	<i>SC</i> (подвижный заполненный)	<i>FE</i> (фиксированный пустой)	<i>FC</i> (фиксированный заполненный)
$M1$	23,75	22,73	30,25	42,86
$M2$	30,94	34,71	37,77	49,90
$M3/M4$	46,85	61,36	61,09	89,03
$M5$	81,54	93,43	107,96	137,39

Модальные частоты портала сведены в табл.3. На базе её построена гистограмма на рис. 3. Из неё видно, что самые низкие резонансные частоты присущи пустому подвижному варианту (*SE*, «Гентри»). Соответственно, этот вариант должен быть самым склонным к резонансным раскачкам.

Подъем резонансных частот происходит как при фиксации портала, так и при заполнении его бетоном. Лучше всего эти приемы применить одновременно (*FC*). Тогда все резонансные частоты возрастают в 1,6 – 1,9 раза. Это является предпосылкой меньших амплитуд вибраций в портале.

Заполнение бетоном подвижного портала (переход от *SE* к *SC*) повышает частоту только моды $M3$, которая связана с жесткостью траверсы. Нижние резонансные моды $M1$ и $M2$ почти не меняют свою частоту. Резонанс по $M1$ немного смещается в сторону низких частот. Это происходит из-за утяжеления портала. Подвижность портала мешает бетону улучшить продольную жесткость.

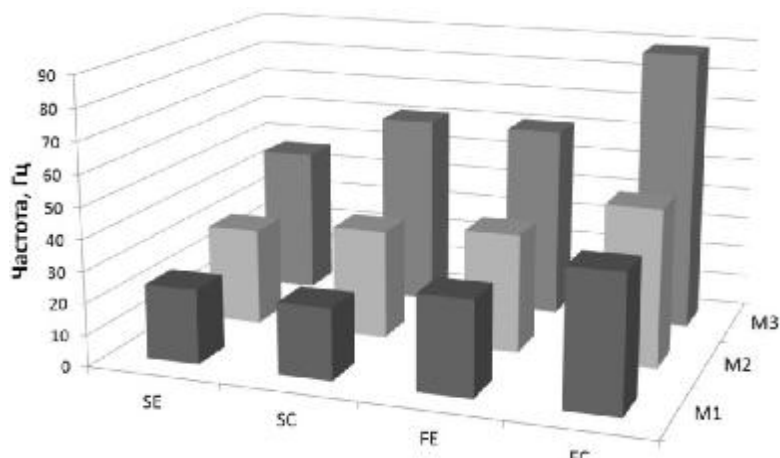


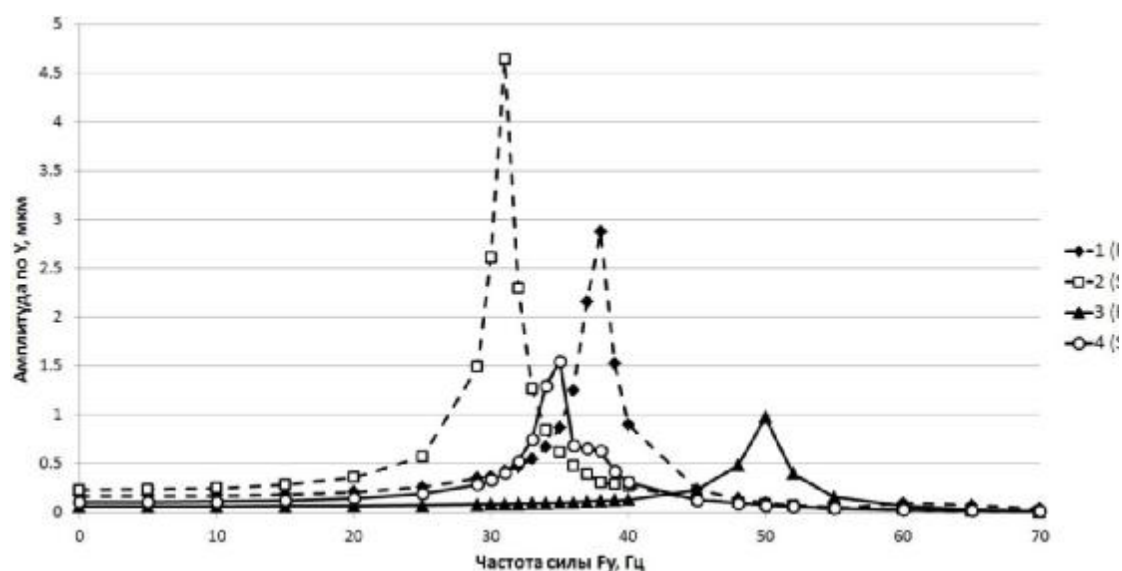
Рис. 3. – Влияние вариантов исполнения (*SE, SC, FE, FC*) на резонансные частоты портала для мод *M1, M2, M3*

Табл.3 и рис. 3. показывают также, что закрепленный пустой портал (*FE*) имеет более высокие резонансные частоты, чем подвижный (*SE*). По модам различие колеблется от 22% до 32%.

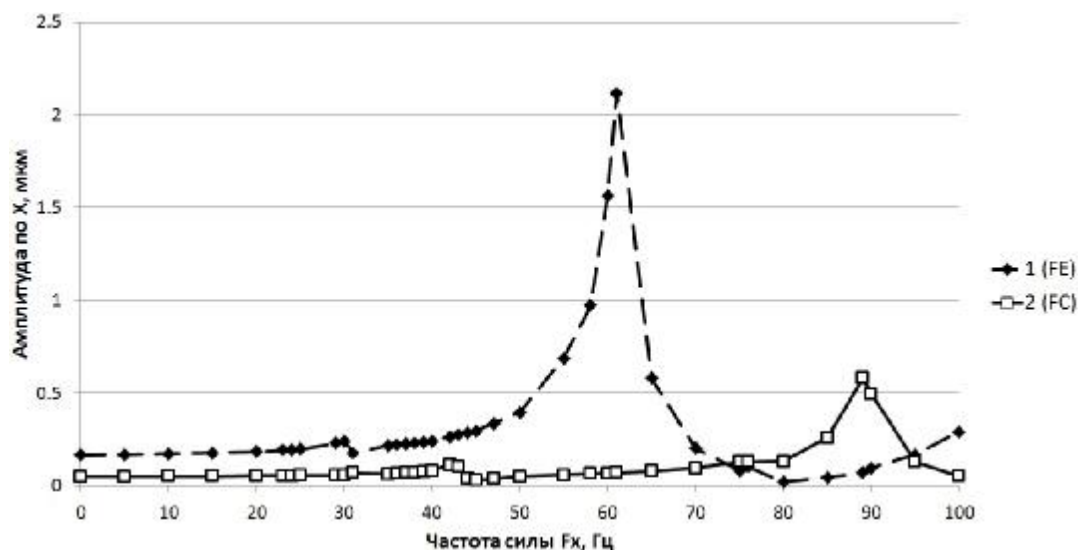
Гармонический МКЭ-анализ портала и АЧХ «сила – перемещение».

Гармонический анализ заключался в приложении к шпинделю осциллирующей силы, отображающей колеблющуюся силу резания. Сила прикладывалась последовательно по осям *X, Y, Z* на частотах от 0 до 100 Гц и имела амплитуду 100 Н. Место приложения силы – конец шпинделя (стык 1 и 2 на рис. 1.). Сила являлась входным сигналом, возбуждающим колебательную систему – портал. Выходными сигналами были перемещения конца шпинделя по осям. График «вход – выход» является амплитудно-частотной характеристикой системы (АЧХ).

Типичная расчетная АЧХ представлена на рис. 4.а. Она отображает влияние частоты поперечной силы резания на поперечное перемещение шпинделя. Белые маркеры соответствуют подвижным вариантам портала, а черные – зафиксированным. На всех линиях отразилось только резонансное возбуждение по моде *M2*. Кроссинг от продольных мод *M1, M3/M4* не наблюдается.



а



б

Рис. 4. – АЧХ поперечного (а) и продольного (б) перемещений шпинделя. Входы – гармонические силы на шпинделе (амплитуда 100 Н)

Самая сильная поперечная раскачка происходит для пустого, подвижного портала (линия 2 на рис. 4.а; вариант *SE*). Фиксация портала (линия 1, вариант *FE*) является мощным средством и для ослабления резонансной амплитуды, и для сдвига резонансной частоты вверх.

Заполнение портала бетоном во всех случаях ограничивает поперечную резонансную раскачку. Вероятно, главным обстоятельством является повышение угловой жесткости портала. Для подвижного портала амплитуда резонанса по *M2* падает в 3 раза (линии 2 и 4).

Еще более сильно влияет бетон на зафиксированный снизу портал. Сопоставление линий 1 и 4 показывает, не только втрое снижается амплитуда, но и частота моды *M2* повышается в 1,32 раза, выходя из области низких частот (0 - 50 Гц). Вариант неподвижного заполненного портала (*FC*, линия 4) оказывается самым предпочтительным в сдерживание поперечного резонанса. Отметим, что эффект достигнут при низком внутреннем демпфировании в модельном бетоне. Оказалось достаточным просто изменить упруго-массовую картину портала. Применение сильно демпфирующего бетона является следующим шагом в улучшении динамики портала.

На рис. 4.б даны АЧХ для продольного направления при условии фиксации портала. Для обоих вариантов *FE*, *FC* обнаруживается неравномерность возбуждения различных резонансных мод. Так, мода *M1* возбуждается слабо и почти не мешает работе станка на её частоте. Сильный резонанс ожидается только на моде *M3* «Клевки ползуна» в районе 60 Гц (линия 1 на рис. 4.б). Заполнение портала бетоном (даже слабо демпфирующим) вчетверо снижает амплитуду колебаний шпинделя и поднимает частоту на уровень 90 Гц.

Таблица 4. Влияние структурного варианта на амплитуды резонансных колебаний шпинделя (мкм; для *M1*, *M3* – продольное перемещение, для *M2* - поперечное)

Мода	Вариант исполнения портала			
	<i>SE</i>	<i>FE</i>	<i>SC</i>	<i>FC</i>
<i>M1</i>	1,42	0,24	1,94	0,103
<i>M2</i>	4,63	2,87	1,54	0,97
<i>M3</i>	2,95	2,11	0,56	0,58

Однако, если портал подвижен, то складывается совсем другая ситуация (табл.4). Во-первых, активно возбуждается самая низкочастотная мода *M1* «Клевки портала». Во-вторых, применение бетона усиливает резонанс *M1*. Это происходит из-за утяжеления портала. Продольную жесткость подвижного портала бетон не может увеличить, так как она ограничена

жесткостью продольных приводов. В результате идет более сильная накачки энергии в портал на резонансе M1 (отрицательный эффект).

Обсуждение и выводы.

Влияние конструктивных вариантов портала на возбуждение продольных и поперечных резонансов по модам M1, M2, M3 графически представлено на рис. 5.

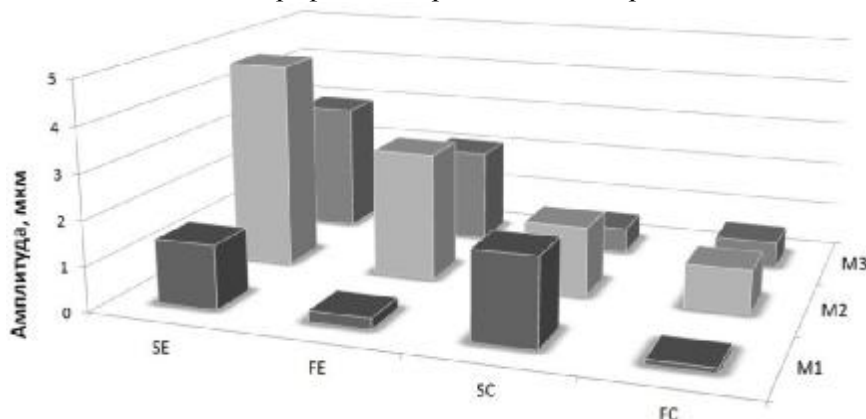


Рис. 5. – Влияние структурного варианта портала на амплитуду колебания шпинделя (M1, M3 – продольное перемещение; M2 – поперечное)

Зафиксированный и заполненный бетоном портал (вариант FC) оказывается самым устойчивым к вибрациям решением. Он рекомендуется для тяжелой обработки при широком частотном диапазоне колебаний сил резания. На варианте FC можно основывать будущие станки ОАО «МЗОР». Это обеспечит всестороннее динамическое качество машины.

Используемый на практике вариант SE («Гентри») склонен к резонансным раскачкам. В станках этого типа придется или приспособливаться к межрезонансной обработке, или использовать зарезонансные частоты в соответствии с концепцией высокоскоростной обработки (BCO, HSM) [11, 14].

Для подавления продольной резонансной раскачки портала по самой низкочастотной моде M1 «Клевки портала» ведущим действием является фиксация портала (варианты FE, FC). Заполнение бетоном без фиксации (SC) только усиливает раскачку (по сравнению с пустым подвижным порталом – SE).

Для сдерживания поперечной резонансной раскачки портала по моде M2 «Параллелограмм» примерно одинаково эффективны как фиксация портала, так и заполнение его бетоном. Наиболее податливым вариантом является пустой подвижный портал (SE). Динамическая жесткость повышается в 4,77 раза при переходе в концепции станка к фиксированному заполненному portalу.

Для сдерживания клевковых и крутильных раскачек по более высокочастотным резонансным модам (M3/M4 и M5) рекомендуется заполнение траверсы бетоном. Для данных резонансов различие между подвижным и неподвижным порталами невелико.

Вариант подвижного заполненного портала (SC) не дает повышения динамической жесткости в продольном направлении. Данный вариант нерационален.

Ключевым моментом в усилении портала является заполнение бетоном именно траверсы. Высокое расположение этой детали не создает динамических проблем при условии фиксации портала и заполнении бетоном нижележащих деталей - колонн и саней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирайdt, Ю.Н. Продукция УП «МЗОР» / Ю.Н. Кирайdt // Машиностроение-2010: технологии – оборудование – инструмент – качество: междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 – 8 апр. 2010 г. / Минск: Бизнесофсет, 2010. – С. 91-92.

2. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М.И.Браиловский, А.Г.Воскобойник, А.А.Воскобойник. – Коломна, Воентехиздат. – 2010. – 76 с.

3. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.
4. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
5. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С. Трусовский, Туми Эль-Мабрук Абужадар Али // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О.Сухого. – 2011. – №3(46). – С.15–28.
6. Повышение жесткости ползуна продольно-фрезерного станка с подвижным порталом / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С.Трусовский, Туми Эль-Мабрук Абужадар Али. // Вестник Полоцкого государственного университета. В. Промышленность. Прикладные науки. №11, 2011, с.104-112.
7. Модальный анализ портала тяжелого продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша, Туми Эль-Мабрук Абужадар Али, И.Л. Ковалева, С.С. Довнар, И.И. Шумский // Вестник Полоцкого государственного университета. В. Промышленность. Прикладные науки. 2013. - №3. С. 38 - 48.
8. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ / С. С. Довнар, А.М. Якимович, И.Л. Ковалева, И.И. Шумский. // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. - №11. С. 25 - 36 .
9. 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.
10. МКЭ-анализ гармонического возбуждения горизонтального фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричной стойкой / Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, А.С. Трусовский // Машиностроение. 2014. - № 28 . С.112 - 120.
11. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой / Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, А.С. Трусовский, И.И. Шумский // Наука и техника. 2015. - № 3 . С. 9 - 19.
12. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
13. www.redex-andantex.com
14. Кунец, Г. Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – с. 35–37.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С., Якимович А.М., Ковалёва И.Л., Трусовский А.С.

***МКЭ-АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ НА МНОГОЦЕЛЕВОМ СТАНКЕ***

Белорусский национальный технический университет,

ОАО «МЗОР» - Управляющая компания холдинга «Белстанкоинструмент»

Минск, Беларусь

С помощью МКЭ проведен статический, модальный и гармонический анализ поведения тонкостенной габаритной трубы из композиционного материала. Труба обрабатывается резанием и склонна к резонансному возбуждению. Установлено, что и в статике, и в динамике ведущим деформационным движением является прогиб стенки под инструментом. Выявлен диапазон мощных комплексных резонансов на частотах между 25 и 40 Гц. Описано поведение систем пучностей на поверхности трубы. Они создают плотно расположенные резонансные пики. В некоторых межпиковых провалах, тем не менее, возможна эффективная обработка. Системы пучностей становятся многоволновыми и хорошо демпфируются на частотах выше 100 Гц. Рекомендовано обрабатывать вращающуюся трубу или точением на низких частотах (<20 Гц) или фрезерованием на высоких частотах (>80 Гц) согласно концепции высокоскоростной обработки (ВСО).

Предмет исследования. Работа связана с созданием специализированного крупногабаритного станочного комплекса для наружной обработки труб из композиционных материалов. Комплекс разрабатывался на базе серийного станка МСП6401 ОАО «МЗОР». Станок относится к типу «Подвижная стойка» (“Travelling column”) и уже изучен в серии