

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С., Сметанко А.А., Сокоров И.О., Ковалева И.Л.

**МКЭ-АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРБЕТОННОГО УСИЛЕНИЯ  
ТОКАРНОГО ИНВЕРТОРНОГО СТАНКА. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
И ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ**

*Белорусский национальный технический университет, ОАО «МЗЛ»*

*Минск, Беларусь*

*С помощью МКЭ проведен гармонический анализ вертикального инверторного токарного станка. Построены АЧХ. Проанализированы линии динамической жесткости для инструмента и детали в шпинделе. Несущая система из трех корпусов рассмотрена пустотелой, а также заполненной полимербетоном. В диапазоне от 30 до 250 Гц исследовано возбуждение 12 резонансных мод, относящихся к четырем типам. Большинство мод в пустотелом станке угрожает точности и устойчивости процесса резания.*

*Установлено, что пружинно-массовые (рельсовые) моды (33,9 и 63,3 Гц) почти не чувствительны к полимербетонному усилению. Их следует демпфировать динамическими гасителями и противорезонансным управлением приводами от ЧПУ.*

*Полимербетон внутри суппорта, стойки и станины хорошо гасит корпусные резонансные моды (48,7 и 233,7 Гц). Здесь марка полимербетона не принципиальна. Полимербетон очень важен под револьверной головкой. Он подавляет и сдвигает вверх по частоте резонансные клевки. Поведение инструмента становится квазистатическим во всем диапазоне рабочих частот.*

*Полимербетон эффективен против многочисленных рельсо-корпусных мод (от 80,1 до 232,3 Гц). Показано, что с помощью полимербетона можно обеспечить средний уровень динамической жесткости  $\sim 70 \frac{H}{мкм}$ . Возможна точная работа станка во всем диапазоне частот,*

*в том числе «поверх» резонансов. Для этого нужно сочетание высокой демпфирующей способности полимербетона и градиентного метода заполнения корпусов.*

**Постановка задачи.** Данная работа является продолжением статьи [1] о динамике вертикального токарного инверторного станка (ВТИС – рис.1) и использует все ее обозначения. В статье-предшественнике с помощью метода конечных элементов (МКЭ) был проделан статический и модальный анализ станка. В рабочем диапазоне (0 – 250 Гц) было обнаружено и классифицировано 12 резонансных мод. Две существенные моды для примера отображены на рис.1 а,б.

Настоящая работа посвящена гармоническому анализу станка[2-4]. Парные противоположные осциллирующие силы (образы сил резания) будут прикладываться к детали 1 (закреплена в шпинделе в шпиндельной головке ШГ – 4) и к инструменту 2 (относительно длинному и тонкому резцу в револьверной головке РГ – 3). В чугунных корпусах (5 – суппорт, 6 – стойка, 7 – станина) могут находиться бетонные вставки.

Станок будет виртуально испытан по всем трем координатам: радиальной (продольной) X, тангенциальной (поперечной) Y и по вертикальной Z. Цель испытаний – получение АЧХ (и для детали, и для инструмента) и выявление по ней картины динамической жесткости станка на разных частотах.

В последнее время выработан норматив жесткости «на вершине резца» [5, 6]. Он равен и относится как к статическим, так и к динамическим ситуациям. Реальная жесткость должна быть выше нормативной в любом направлении. Соблюдение норматива жесткости обеспечивает средний уровень точности обработки. Одновременно появляется гарантия, что процесс резания сохранит устойчивость и не сорвется в автоколебания. Наиболее распространенным вариантом автоколебаний являются регенеративные автоколебания [5, 7]. Они могут «привязаться» к какой-либо резонансной частоте станка, если резонансный пик не был подавлен (не соблюден норматив жесткости).

Норматив жесткости  $J_{норм} \geq 20H / мкм$  может относиться именно к вершине резца, если деталь практически неподвижна, или к детали при очень жестком инструменте. Для ВТИС податливы как шпиндель с деталью, так и резец. Поэтому норматив следует применять к их относительному движению. Дадим здесь численную оценку.

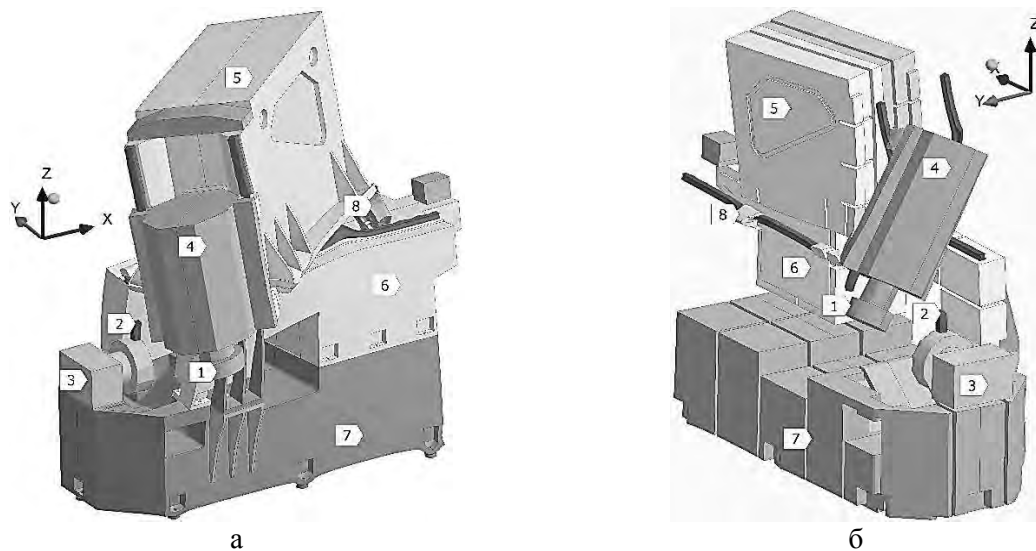


Рис. 1. Резонансные моды MD (а, 80,08 Гц) и MI (б, 173,45 Гц; показаны бетонные вставки без корпусов) для станка с бетонным заполнением (обе моды – типа *ПонРК*): 1 – деталь в шпинделе, 2 – инструмент, 3 – револьверная головка, 4 – шпиндельная головка, 5 – суппорт, 6 – стойка, 7 – станина.

Ниже будет показано, что после усиления станины полимербетоном жесткость резца стабилизируется близко к уровню  $j_p = 70 \text{ Н / мкм}$ . Тогда, исходя из сложения податливостей, получаем, что, для соблюдения общего норматива, жесткость детали должна быть не ниже  $j_d = 28 \text{ Н / мкм}$ . Это соответствует амплитуде колебаний 35 - 36 мкм при действии силы 1000 Н. Данную амплитуду можно понимать, как предельно допустимую при анализе АЧХ. При большей амплитуде резонансный пик следует считать недостаточно подавленным, а работу на близкой к нему частоте – опасной.

**Подходы к управлению динамикой несущей системы станка.** Для защиты станка от резонансной раскочки внешней силой (силой резания) можно использовать три подхода [2, 5, 8].

Резонансный пик сдвигают вверх по частоте, например, увеличением жесткости конструкции и снижением её массы. Тогда амплитуда колебаний сама собой падает (при данной амплитуде силы) исходя из закона сохранения энергии. Кроме того, на высоких частотах больше естественное демпфирование вибраций.

Резонансный пик подавляют введением в конструкцию высокодемпфирующих материалов или объектов.

Резонансные колебания уравнивают созданием контрсилы. Контрсила может возникать самопроизвольно в инерционном гасителе, реализующем эффект антирезонанса [3, 9], или создаваться в интеллектуальном приводе, например, с помощью УЧПУ станка, двигателя подачи и датчиков обратной связи.

Применение полимербетона полностью соответствует подходу **П2** и частично **П1**. Дело в том, что заполнение бетоном повышает как жесткость, так и массу станка. Они по-разному влияют на частоту резонансов. Поэтому заранее, без МКЭ-анализа, оценить сдвиг резонансной частоты трудно.

Обычно получается, что заполнение бетоном немного повышает резонансные частоты станка. Однако, к источнику внешней силы (чаще всего – сила резания) оказывается присоединенной большая корпусная масса. Это и является главным фактором снижения амплитуды вибраций.

**Условия и особенности моделирования.** Деталь в шпинделе и резец нагружались равными по величине и противоположными по направлению осциллирующими силами  $F_H^D = A \cdot \sin(2\pi f_H t)$  и  $F_H^P = -A \cdot \sin(2\pi f_H t)$  (стрелки на рис.1,б[1]). Здесь  $A = 1000 \text{ Н}$  является амплитудой силы,  $f_H$  - частотой испытания,  $t$  - временем. Силы прикладывались по всем трем осям станка. Испытания велись в рабочем диапазоне 0 – 250 Гц с шагом 2,5 Гц. После

прохождения диапазона строились АЧХ. В представленных результатах для любой АЧХ входом является сила по оси, а выходом – амплитуда колебаний по той же оси.

Деталь и резец не имели между собой какой-либо прямой механической связи. Демпфирование в ШВП (пружинах) и вдоль направляющих (рельс) отдельно не моделировалось. В модели был принят относительный коэффициент демпфирования  $\xi_{\Phi=2\%}$ . Он относится ко всем материалам, кроме бетонов. Это демпфирование будем называть фоновым. Кроме того, отдельный коэффициент демпфирования приписывался бетонным вставкам. Его назначали равным  $\xi_o = 2\%, 6\%, 12\%$ . Соответственно, виртуально испытывались низко-, средне- и высокодемпфирующие бетоны.

Обратим внимание на особенности осей станка. Колебательные движения по радиальной оси X являются наиболее важным для обеспечения точности обработки. Они контролируют размеры цилиндрических и конических участков на вытачиваемых валах и втулках.

Тангенциальное направление Y соответствует максимальной силе резания. Осцилляции-резца и детали вдоль него являются наиболее опасными с точки зрения инициирования автоколебаний в процессе резания. Автоколебательный процесс сам по себе вреден для точности детали и качества её поверхности. Дополнительно, он может потерять устойчивость и вызвать грубую раскачку, брак и поломки.

Вибрации в вертикальном направлении Z важны, если нужно обеспечить плоскостность и перпендикулярность оси детали различных торцев и буртиков.

**Гармонический анализ и АЧХ.** Для радиального направления АЧХ приведена на рис.2, а. Сопоставим для неё линии «XPARTЕ» и «XPARTС». Здесь и далее обозначение «PART» указывает на деталь и конец шпинделя (в данной модели почти одно и то же), а «TOOL» - на резец. Обозначения «E» и «C» отмечают пустоту или заполнение бетоном корпусов.

Итак, линия «XPARTЕ» касается пустотелой модели ВТИС при фоновом демпфировании 2%. На линии виден только один мощный пик МАЕ на частоте 35 Гц с амплитудой 78,3 мкм. Это возбуждается рельсовая мода колебаний суппорта МА (рис.2, а[1]). Поэтому усиление корпусов бетоном не оказывает на резонанс большого действия. Вторая линия АЧХ «XPARTС» (рис.2, а) демонстрирует почти такой же пик МАС на близкой частоте 37,5 Гц. Амплитуда его немного меньше (46,7 мкм) из-за общего демпфирующего действия бетона. Однако соответствующая радиальная жесткость () является недостаточной.

Пик рельсовой моды МА нуждается в дополнительном демпфировании. Это может быть сделано размещением инерционного гасителя на суппорте [8]. Более дорогое, но гибкое решение – активизировать в системе ЧПУ *противорезонансное управление* по приводу X. Это реализация подхода ПЗ через момент на двигателе привода X. Такая опция доступна в ряде современных УЧПУ. Она пока может быть включена только для первого по частоте резонанса (соответствует моде МА).

Для линий детали на рис.2,а видно еще несколько относительно небольших пиков. Так проявляют себя моды MD(77,5 Гц), ME (130 Гц) и MG-MH (двойной пик на 160 – 180 Гц). Эти пики очень хорошо демпфируются бетоном. Сравнение линий «XPARTЕ» и «XPARTС» показывает, что высота пиков падает от 2,2 раз (MD) до 4-х раз (ME). Пик MG практически исчезает. Все пики смещаются вправо.

Можно заключить, что корпусные и рельсо-корпусные моды *хорошо* демпфируются полимербетоном. Он оказывается полезным усилением несущей системы.

Для поперечного направления Y (рис.2, б) линии для пустотелого и бетонированного вариантов («YPARTЕ» и «YPARTС») соответственно показывают по четыре резонанса. Это проявляют себя моды MB, MD, MF и MI. Три моды MB, MD, и MI очень хорошо ослабляются бетоном. Амплитуды колебаний падает в 1,9 – 3,1 раза. Существенно возрастают резонансные частоты.

Мода MF смещается по частоте вверх, но амплитуда резонансных колебаний снижается слабо. Это поперечная рельсо-корпусная мода (*ПопРК*). Корпусная компонента в ней мала. В основном, идут поперечные деформации опор качения по обоим направляющим. Поэтому бетон внутри корпусов не имеет возможности себя полностью проявить.

Следует отметить, что на всех АЧХ на рис.2 хорошо заметен статический (дорезонансный) диапазон частот. Он лежит в интервале 0 – 30 Гц и характеризуется почти горизонтальными линиями. Примерно выше 200 Гц начинается зарезонансный диапазон. В нем линии АЧХ

опять обретают пологий ход, но на ещё более низком уровне по сравнению со статикой. Диапазон между 30 и 200 Гц для ВТИС является областью общестаночных резонансов [10, 11].

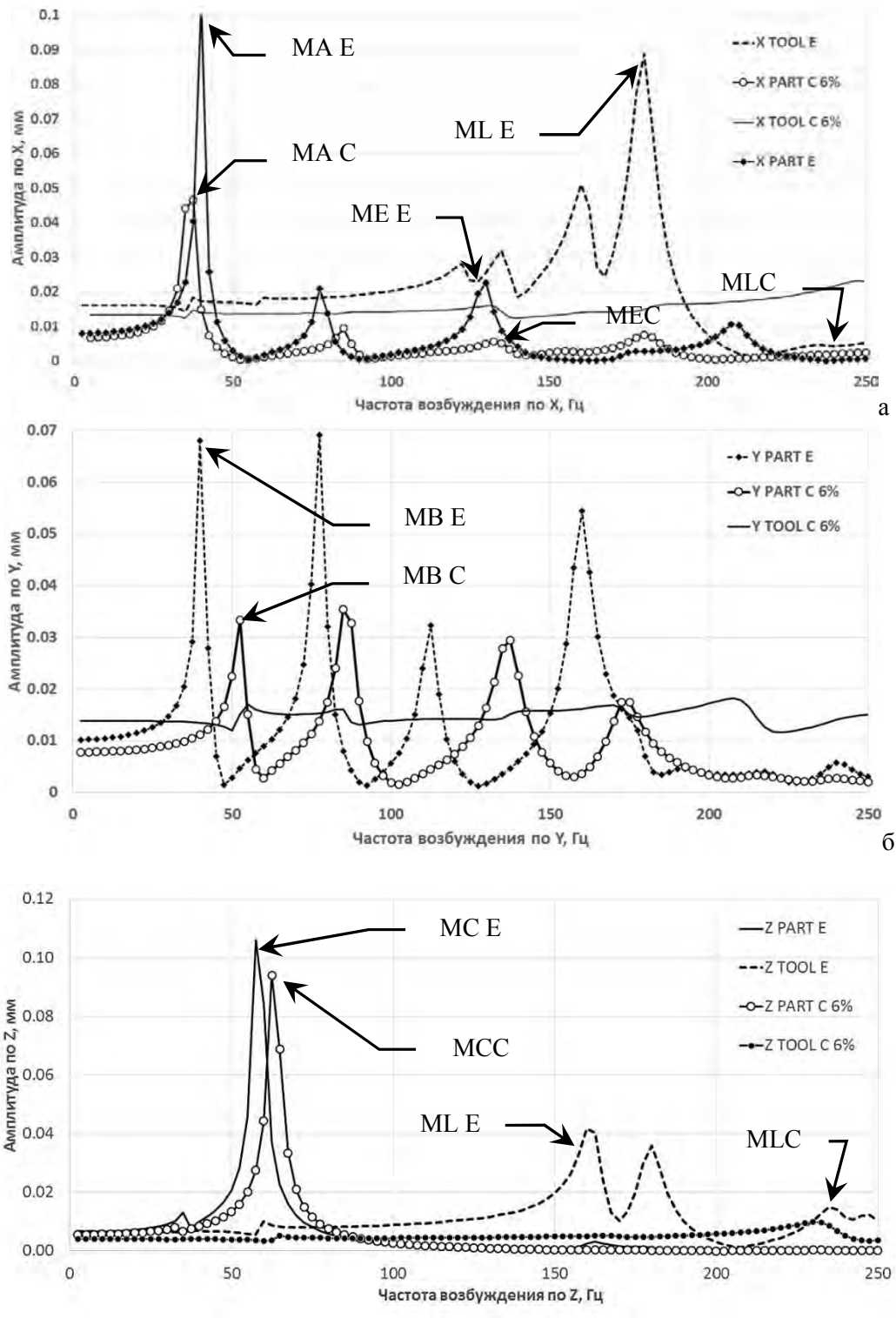


Рис. 2. АЧХ несущей системы в диапазоне 0- 250 Гц для направления воздействующих сил по X (а), Y (б) и Z (в): E – полые корпуса, C – бетон (вариант заполнения gradient)

В вертикальном направлении Z шпиндельная головка и деталь показывают малую виброактивность (рис.2, в). Есть только один резонансный пик – MC. Это рельсовая (пружинно-массовая) мода для ШГ. Поэтому резонанс почти не зависит от усиления бетоном (маркеры

МСЕ и МСС). Моду МСнадо ослаблять также, как и моду МАв рамках подхода ПЗ. Здесь будет эффективно *противорезонансное управление* от УЧПУ уже вертикальным приводом Z.

Обратим внимание (рис.2, а) на АЧХ инструмента (линия «XTOOLE») для пустотелого варианта и линия «XTOOLC 6%»при усилении бетоном по градиентному варианту при коэффициенте демпфирования  $\xi_c = 6\%$  ). При полых корпусах на частотах выше 130 Гц инструмент теряет статическое поведение и возбуждается серией резонансов. Самым мощным является клевковый резонанс ML(рис. 4, б [1]) на частоте 179,75 Гц. Возникает рекордно высокий пик «MLE», вблизи которого работать станку нельзя.

Применение бетона создает жесткую базу под револьверной головкой с инструментом. Резонансные клевки ослабевают по амплитуде и поднимаются по частоте до 233,74 Гц. Этому соответствует пик «MLC», который еле заметен. Такое же гашение моды ML усиленной станиной происходит и по другим осям (например, пики MLE и MLC на рис.2,вдля вертикального направления). Таким образом, применение бетона обеспечивает резцу квазистатическое поведение и примерно постоянную амплитуду (например, линия «YTOOLC 6%» на рис.2, б) по всем осям для всего рабочего диапазона частот. Жесткость резца оказывается умеренной (), но стабильной по частоте.

На рис.3 для разных вариантов заполнения корпусов и разных марок бетона отображены различия в динамике детали («Part» в обозначениях линий АЧХ).Кривая АЧХ для инструмента и заполнения по варианту middle («XPARTCM 12%»)проходит близко к горизонтали и служит своеобразной опорной линией.

Рассмотрим, например, группу резонансных пиков ME. Прежде всего, сам факт заполнения бетоном резко снижает резонансную амплитуду. Во-вторых, линии иллюстрируют известный факт: коэффициент демпфирования влияет на АЧХ только в районе резонанса. Это видно из сравнения «XPARTC 2%»и «XPARTC6%». Они различаются только на пиках. Для второй кривой из-за большего коэффициента демпфирования ( $\xi = 6\%$ ) пики ниже.

В-третьих, резонансные частоты сдвинуты вправо больше всего при градиентном заполнении корпусов. Линия «XPARTCM12%» проходит несколько ниже линии «XPARTC6%» только из-за большего демпфирования. Наилучшим решением было бы градиентное заполнение с максимальным демпфированием («XPARTC12%»).

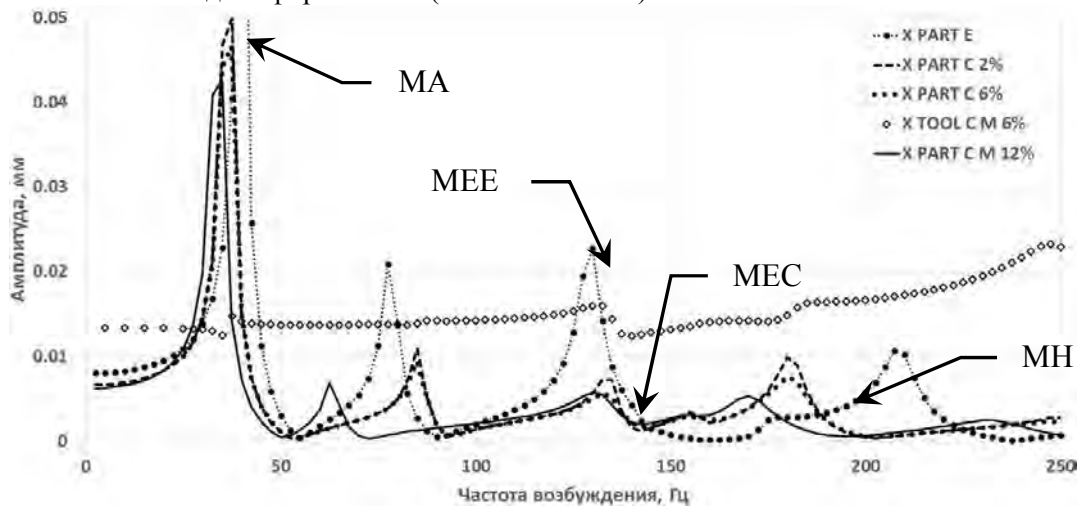


Рис.3. АЧХ в радиальном направлении (X) для разных вариантов заполнения бетоном корпусов (по умолчанию – gradient, отметка «М» – middle, отметка «Е»–empty)

Итак, заполнение корпусов бетоном является первоочередным вопросом. Вторым по важности вопросом является обеспечение высокой демпфирующей способности бетона. В-третьих, внимание нужно уделить плотности бетона. При возможности выбора легким бетоном следует заполнять высоко расположенные корпуса. Вариант *gradient* несколько предпочтительнее однородного заполнения по варианту *middle*.

**Динамическая жесткость станка.** Динамическую жесткость станка в данном направлении можно получить обращением соответствующей АЧХ. Пики амплитуды на АЧХ становятся провалами жесткости (обычно из-за резонансов) и наоборот. Все представленные выше АЧХ пока-

зывают, что после усиления бетоном резонансные пики наблюдаются в диапазоне от 30 до 200 Гц. Это резонансный диапазон или диапазон общестаночных резонансов. Ниже его (0 – 30 Гц) лежит статический (дорезонансный) диапазон, где все линии имеют пологий ход. Выше 200 Гц начинается зарезонансный диапазон, который виртуально исследован только до 250 Гц.

Сводка для динамической жесткости станка по этим диапазонам представлена в табл.1. Через дробь дана минимальная жесткость в резонансном диапазоне (без учета рельсовых мод МАиМС). Жесткость инструмента после усиления станины бетоном становится довольно стабильной. Она приведена в таблице для резонансного диапазона.

**Таблица 1**

**Динамическая жесткость (Н/мкм) на шпинделе ВТИС и инструменте по направлениям и диапазонам (усиление бетоном ( $\xi = 12\%$ ) по варианту middle)**

Средняя жесткость на шпинделе по диапазонам:	Направление		
	X	Y	Z
Статический (0 – 30 Гц)	123,0	118,4	164,9
Резонансный (30 – 200 Гц)	602,1/69,5	154,5/28,8	2248,1/48,1
Зарезонансный (>200 Гц)	710,5	353,5	8288,9
Жесткость инструмента:			
средняя	67,5	68,5	219,4
минимальная	32,9	54,1	122,4
минимальная (пустотелый станок)	15,5 (47%)	18,2 (34%)	24,0 (20%)

Данные в табл.1 показывают, что для всех частотных диапазонов самым жестким является вертикальное направление Z. Самым податливым для всех диапазонов оказывается тангенциальное направление Y.

Самым нестабильным по жесткости является резонансный диапазон. Однако, усиленный бетоном станок выдерживает здесь ограничение по жесткости (). В смысле жесткости виден потенциал зарезонансного диапазона. На зарезонансных частотах массивность частей станка самопроизвольно обеспечивает стабильность конструкции («зарезонансное демпфирование» [3, 5, 8]).

Обсудим более подробно самоемаложесткое направлении Y. Для полимербетона с коэффициентом демпфирования ( $\xi = 12\%$ ) жесткость на шпинделе составила 114,2 Н/мкма частоте 25 Гц (конец статического диапазона). Минимальная жесткость в резонансном диапазоне (30 – 200 Гц) оказалась равна 28,8 Н/мкм (мода MD, 80 Гц). Здесь же средняя жесткость составила 154,5 Н/мкм.

Средняя жесткость в зарезонансном диапазоне (от 200 до 250 Гц) достигает весьма высокого уровня 353,5 Н/мкм. Это втрое больше, чем в статике. На зарезонансную среднюю жесткость практически не влияет коэффициент демпфирования бетона. Даже для пустотелого варианта этот параметр высок и составляет 306,3 Н/мкм. Зарезонансный диапазон обладает большим потенциалом для точной обработки. При условии перехода на концепцию ВСО [12] и применении полимербетона станок должен стать точным и производительным одновременно.

Динамическая жесткость на инструменте по Y весьма стабильна во всем диапазоне. Она имеет среднюю величину 68,5 Н/мкм и колеблется от 54,6 до 85,8 Н/мкм.

Графики тангенциальной жесткости даны на рис.4. Они построены для бетонов с разной демпфирующей способностью. Линия жесткости для инструмента «УТООЛ 6%» почти горизонтальна и служит своеобразным репером. Линия «УРАТЕ» относится к пустотелому ВТИС.

Провалы на рис.4 происходят на резонансных частотах, когда жесткость системы резко снижается. Подъемы соответствуют антирезонансным эффектам внутри станка. При внешнем возбуждении на антирезонансной частоте какая-либо подсистема станка входит в свой внутренний резонанс. Он самопроизвольно настраивается в противофазе к силе резания и динамически гасит её действие. Силы на детали и шпинделе уравниваются. Эти объекты только на частоте антирезонанса становятся малоподвижными и квазижесткими.

На практике в первую очередь нужно устранить провалы на графике жесткости. Этих провалов пять. Первый из них (MB, рис.2, а) обусловлен изгибными колебаниями всего станка. За опасные провалы MD, MFи MПотвечают крутильные колебания суппорта и ШГ вокруг вер-

тикального и радиального направлений. Пятый провал (MJ) тоже является крутильным. Однако он менее глубокий и относится к высоким частотам.

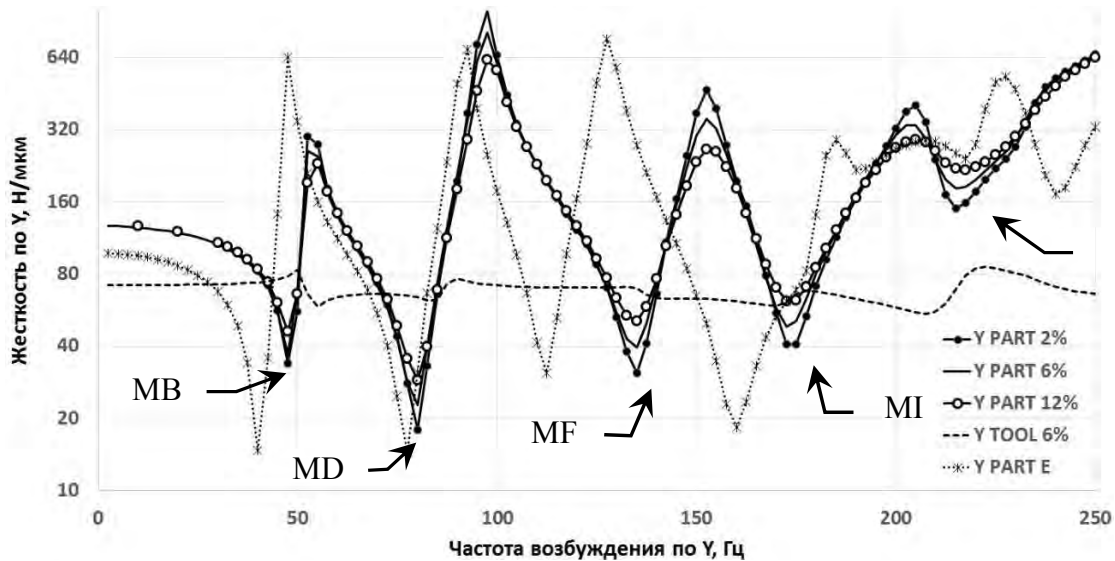


Рис. 4. Динамическая жесткость станка по Y в зависимости от частоты испытания и коэффициента демпфирования бетона (вариант заполнения – *middle*)

Диаграмма на рис.5 показывает воздействие бетонного усиления на динамическую жесткость над резонансными пиками различных мод. Работа «поверх» резонансов оказывается допустимой (жесткость выше 28 Н/мм). Однако для этого требуются марки бетона с весьма высокими коэффициентами демпфирования.

Реакция на применение полимербетона своеобразна для каждой моды. Например, мода MF индифферентна к применению низко демпфирующего бетона ( $\xi = 2\%$ ). Динамическая жесткость остается почти такой же, как и в пустотелом варианте.

Для мод MB и MI, наоборот, достаточно любого бетонного заполнителя, чтобы жесткость на резонансе достигла безопасного уровня. Самой трудно подавляемой оказалась крутильная резонансная мода MD. Применение бетона, пошаговое повышение его демпфирующей способности дает каждый раз лишь небольшое повышение жесткости на резонансе.

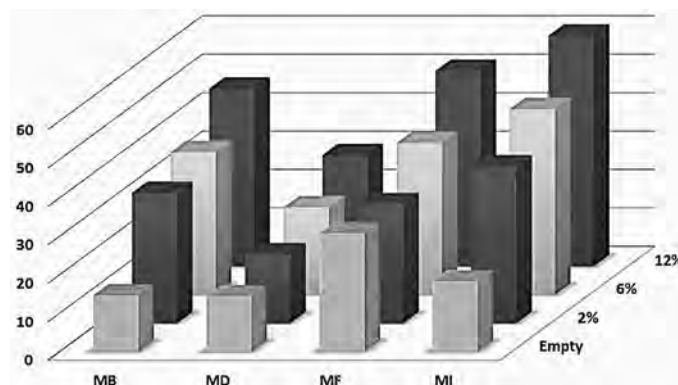


Рис. 5. Диаграмма динамической жесткости станка на различных резонансах в направлении Y (заполнение по варианту *middle*)

Для дальнейших шагов по ослаблению общестаночных резонансов ВТИС рекомендуется на конструкцию и свойства опор качения (танкеток) на вертикальном и продольном приводах станка.

## Выводы и рекомендации

1. Для несущей системы станка по всем трем осям X, Y, Z выявлено три частотных диапазона – статический (дорезонансный, 0 – 30 Гц), резонансный (30 – 200 Гц) и зарезонансный (> 200 Гц). В резонансном диапазоне для каждого направления наблюдается до 4-х общестационарных резонансов.

2. Наименее динамически жестким является тангенциальное направление Y. Наиболее жестким оказывается вертикальное направление Z.

3. В «податливом» направлении Y средний уровень динамической жесткости в статическом, резонансном и зарезонансном диапазонах составил соответственно 118, 154 и 353 Н/мкм. На резонансах жесткость может опускаться до 28,8 Н/мкм, что, однако, допустимо.

4. Полимербетон является для ВТИС эффективным средством гашения большинства резонансных пиков. Амплитуды резонансных пиков падают в 2 – 3 раза (иногда до 4-х раз). Бетонные вставки ослабляют резонансные колебания у корпусных мод и у комбинированных мод с существенной корпусной компонентой.

5. Усиление полимербетоном позволяет вести обработку в непрерывном частотном диапазоне, в том числе, и над подавленными резонансными пиками. Нормы динамической жесткости соблюдаются даже при совпадении рабочей частоты станка и частоты демпфированного полимербетоном резонанса.

6. Условием работы станка над резонансами является применение только высокодемпфирующих марок полимербетона. В зарезонансном диапазоне демпфирующая способность бетона менее существенна.

7. Усиление полимербетоном станины очень эффективно для динамики инструмента. Под револьверной головкой создается жесткая база, сохраняющая стабильность во всем частотном диапазоне. В результате в диапазоне от 0 до 250 Гц инструмент и головка не вовлекаются в сколько-нибудь существенные колебания.

8. Длинный и относительно тонкий инструмент обладает умеренной жесткостью в направлениях X и Y. Однако, эта жесткость остается стабильной во всем частотном диапазоне. Благодаря полимербетону инструмент всегда находится в статическом или квазистатическом состоянии.

9. Для всех резонансных мод усиление корпусов полимербетоном поднимает собственную частоту. Степень подъема зависит от существенности деформации корпусов в модальном движении.

10. Для рельсовых (пружинно-массовых) мод (M<sub>АпоX</sub> и M<sub>СпоZ</sub>) полимербетонное заполнение корпусов малоэффективно. Соответствующие резонансы, поскольку они низкочастотные, можно подавлять активным противодействием со стороны интеллектуальных приводов и ЧПУ станка.

11. Рекомендуется шире использовать для обработки самый жесткий, зарезонансный диапазон (выше 200 Гц). Для этого нужен высокоскоростной главный привод и переход на чистовые и получистовые режимы точения.

12. Бетонное усиление корпусов (желательно, в варианте *gradient*) строго рекомендуется для станка в сочетании с противорезонансным управлением приводами X и Z от системы ЧПУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Довнар, С.С. МКЭ-анализ эффективности полимербетонного усиления токарного инверторного станка. Статический и модальный анализ / С.С.Довнар, А.М.Якимович, И.О.Соколов, А.А.Сметанко// Машиностроение. 2016. - № 30. С.. В печати.
2. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
3. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
4. Козловский, Н.А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н.А. Козловский, М.П. Зайкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 135 с.
5. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.
6. T. Schmitz, G.S. Duncan, Three component receptance coupling substructure analysis for tool point dynamics prediction, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2005, 127, pp. 781–790.



7. 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.
8. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. — М.: Машиностроение, 1981. — Т. 6. Защита от вибрации и ударов /Под ред. К. В. Фролова. 1981, - 456 с.
9. Wahl, F.; Schmidt, G.; Forrai, L. On the significance of antiresonance frequencies in experimental structural analysis / *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 219, iss. 3, p. 379-394.
10. Довнар, С.С. 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.
11. 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.
12. 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., Соколов И.О., Ермалович В.И., Моцук Е.А.**

**АНАЛИЗ ПУТЕЙ РЕНОВАЦИИ ТЯЖЕЛОГО ТОКАРНОГО СТАНКА  
С ПОМОЩЬЮ МКЭ-ИСПЫТАНИЙ**

**ЧАСТЬ 1. СТАТИКА И ДИНАМИКА РАДИАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В интересах реновации проведен статический, модальный и гармонический МКЭ-анализ тяжелого токарного станка. В диапазоне общестаточных резонансов найдены три опасные моды: изгибы обрабатываемого ротора на 17,7 Гц (полуволна) и 36,1 Гц (волна), раскочка суппорта на 68,1 Гц. Оценена статическая и динамическая жесткость. Показано, что несущая система обладает хорошим потенциалом жесткости, но имеет три податливых места. Это угловая податливость переднего конца шпинделя, недостаточная жесткость станины под суппортом и малая база задней бабки.*

*Виртуальными испытаниями отфильтрованы факторы, не оказывающие большого влияния на жесткость. Для подавления резонансов предложено превратить планшайбу в шпиндельный стол с дополнительными подшипниками, заполнить станину под суппортом полимербетоном и превратить заднюю бабку в контршпиндель. Совокупность мер позволит снизить амплитуду главного резонанса в 6,3 раза и отодвинуть вверх его частоту вдвое – с 17,7 до 35 Гц. Реновированный станок должен стать малочувствительным к резонансам в рабочем диапазоне частот.*

**Предмет исследования.**

Сверхтяжелые токарные станки (СТТС) классической компоновки занимают в мировом станочном парке одну из стратегических позиций. Только на них можно обрабатывать крупные валы для энергомашиностроения. Чаще всего валы входят в состав роторов генераторов и турбин. Обычно на одном СТТС выполняется полный цикл обработки ротора – от обдирки корки до прецизионной обработки посадочных мест.

Это требует от станков не только точности, но и статической жесткости и динамической стабильности на черновых и чистовых операциях. Однако, обычно технологи опираются не столько на станок, сколько на осторожность обработки (малые режимы), а также на применение системы люнетов. Это замедляет производство и требует мастерства токаря и его адаптации к данному станку. Следовало бы реализовывать более современный и унифицированный подход – адаптировать к станку систему ЧПУ. Для этого нужна достаточно жесткая и предсказуемая несущая система станка.