

## МКЭ-АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ МЕР ПО УСИЛЕНИЮ БЕТОНОМ КОМПАКТНОГО 5-ОСЕВОГО СТАНКА

<sup>1</sup>Довнар С. С., <sup>1</sup>Яцкевич О. К., <sup>1</sup>Авсиевич А. М., <sup>1</sup>Колесников Л. А.,  
<sup>2</sup>Яворский А. В.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

<sup>2</sup>ОАО «СтанкоГомель», Гомель

**Введение.** Работа связана с созданием на ОАО «СтанкоГомель» машины-лидера для гаммы компактных токарно-фрезерных станков (ТФС) с ЧПУ. Станок имеет пять степеней свободы (рисунок 1), из которых три (X, Y, Z) являются линейными, а две (A, C) – вращательными, вынесенными на глобусный стол. ТФС является результатом развития прототипа – многоцелевого станка [1].

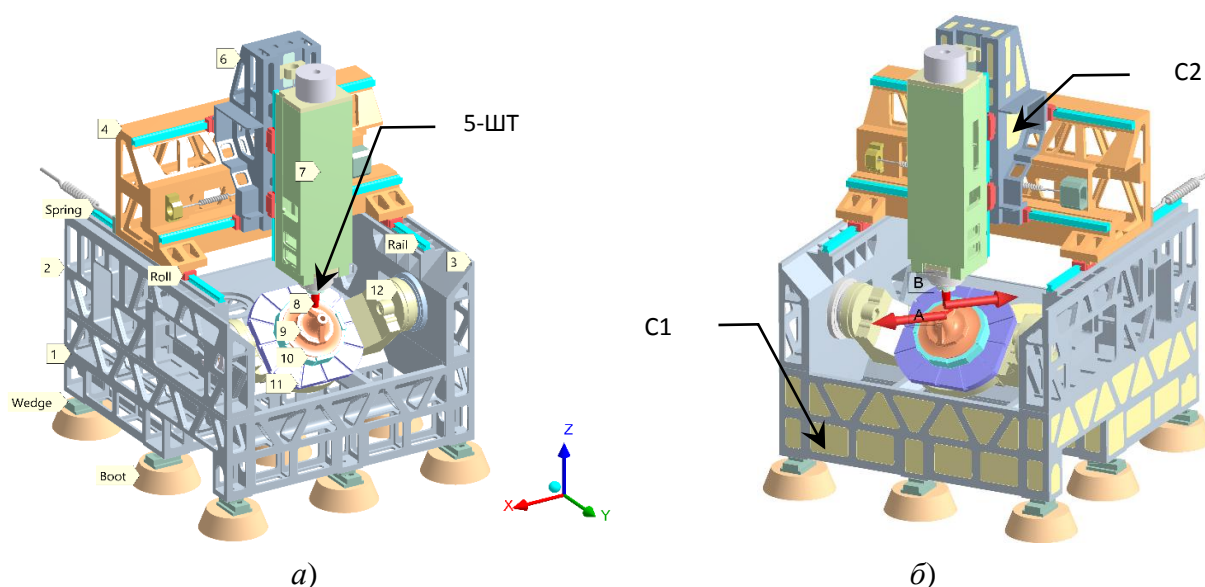


Рис. 1. Несущая система ТФС в пустотелом (а; ПЧ) и частично бетонированном (б; БТСС) вариантах: 5-ШТ – стык ШУ и торца ползуна

По сравнению со станком-прототипом, ТФС требуется усиление несущей системы (НС) без ее глубокого перестроения. НС создается литыми чугунными структурными деталями (СД). Несущая система должна обеспечить высокую статическую и динамическую жесткость для инструмента и детали.

### Обозначения:

НС – несущая система (станка);

СД – структурная деталь (обычно, корпусная литая чугунная деталь);

Бетон – обобщение разных марок полимербетонов и бетонов УНРС;

ТФС – токарно-фрезерный станок;

ШУ, ШТ – шпиндельный узел, шпиндельный торец (на ползуне);

СВ – структурный вариант НС (перечислены ниже);

ПЧ – пустотелая чугунная НС (*исходный вариант*),

БТСС – «бетон только в станине и суппорте» (*бетон по низу*),

ЧБ – чугунно-бетонная НС (*полное бетонирование*).

**Цель исследования.** Нужно предложить структурные варианты несущей системы станка, проанализировать их жесткость и дать рекомендации по усилению НС. Анализ должен быть проведен до производства станка. Поэтому необходимо МКЭ-моделирование.

Замысел работы заключался в применении бетона (полимербетона, бетона УНРС и т. д.). Бетоном можно заполнить полости в отливках и усилить НС [2]. Виртуально испытать эффективность этого решения нужно с помощью МКЭ.

**Геометрическая модель объекта исследования.** Станок включает в себя (рисунок 1) станину 1, стенки 2 и 3, траверсу 4 (подвижную по Y), суппорт 6 (движется по траверсе вдоль X), ползун 7 с вертикальной подвижностью по Z. Шпиндельный узел 5 находится на нижнем, шпиндельном торце ползуна (реперная точка 5-ШТ) и удерживает инструмент 8. Деталь 9 закреплена через патрон 10 во вращающейся планшайбе 11 глобусного стола. Основой стола является качающаяся люлька 12.

Станок размещен на 11-ти фундаментных опорах (Boot) и выставлен горизонтально с помощью клиновых механизмов (Wedge). Подвижность по X, Y, Z обеспечивается тремя парами направляющих качения, состоящих из рельсов (Rail) и танкеток (Roll). Привода подачи представлены как пружины (Spring).

На рисунке 1, а показан структурный вариант ПЧ с пустотелыми корпусными деталями. Это исходное решение. Вариант частичного заполнения полостей БТСС представлен на рисунке 1, б. Маркеры C1, C2 указывают на бетон в станине и суппорте соответственно.

Вариант полного бетонирования ЧБ показан на рисунке 5, б. Здесь видны затвердевшие бетонные блоки. Охватывающие их чугунные отливки скрыты.

На рисунке 1, б стрелками показаны две противоположные по направлению и равные по величине силы. Их будем называть *парой сил*. Они нагружают инструмент и деталь для тестирования их жесткости. Направление пары сил будет варьироваться. Эти силы уравнивают друг друга в масштабах станка. Инструмент и деталь в данной работе не связаны между собой непосредственно.

**Постановка исследования и допущения.** Виртуальные испытания трех структурных варианта ПЧ, БТСС и ЧБ заключаются в статическом, модальном и гармоническом анализе. Статический анализ характеризует нагружение НС при установившемся резании (точение). Модальный анализ выявляет резонансные моды. В случае переменного резания (фрезерование) осциллирующие силы способны на резонансах раскачать НС и нарушить точность и стабильность обработки. Это должен предсказать гармонический анализ.

МКЭ-моделирование было проведено в линейной постановке. Материалы приняты подчиняющимися закону Гука и нагружаемыми в пределах упругости. Геометрическими нелинейностями пренебрегали ввиду малости деформационных перемещений. Сухое или вязкое трение не моделировалось. Контактные нелинейности отсутствовали.

Напряжения в станочных системах в большинстве случаев являются низкими. Эти НС работают на жесткость, а не на прочность. Для выявления линейной жесткости сила нагружения не принципиальна. В данной работе каждой силе в паре устанавливали величину (амплитуду) в 1 кН. Направление пары сил варьировали, делая их параллельными X, Y и Z. Данные допущения сделаны как для статического, так и для гармонического анализа.

Жесткость ШУ на шпиндельном торце ползуна (5-ШТ, рисунок 1, а)  $J_{x,y,z}^{шт}$  оценивается как отношение приложенной силы (например,  $F_{x,y,z}$ ) к деформационному перемещению в том же направлении ( $u_{x,y,z}$ ).

Вращение шпинделя с инструментом не моделируется. Тормоза глобусного стола включены. Поэтому люлька и планшайба заблокированы от поворотов.

**МКЭ-модель и ее параметры.** МКЭ-модель представляет собой совокупность конечно-элементных сеток отдельных солюдов (198 штук). Главными материалами солюдов являются сталь, чугун и бетон. Механические свойствами материалов взяты согласно апробированным случаям МКЭ-анализа станков [2–4]. Модуль упругости бетона принят равным  $E_6 = 36$  ГПа. Плотность бетона взята как  $\rho_6 = 2650$  кг/м<sup>3</sup>. Соответствующие показатели чугуна –  $E_ч = 130$  ГПа и  $\rho_ч = 7200$  кг/м<sup>3</sup>.

Масса чугунных структурных деталей составляет 3957 кг. Частичное бетонирование (БТСС) требует 3269 кг бетона. Для полного бетонирования нужно бетона 5587 кг. Масса ползуна в сборе составляет 601 кг.

Жесткость пружин – привод подач по Y, настроена равной 300 Н/мкм. Пружинам по X и Z согласно каталогам установлена жесткость по 400 Н/мкм.

Все детали в сборках неподвижно скреплены друг с другом контактными парами в статусе *bonded*. Именно так бетонные вставки сцеплены с солюдами–отливками. На линейных направляющих разрешено идеализированное скольжение без трения. Для этого контактные пары между рельсами и танкетками установлены в статус *no separation*.

Для гармонического анализа материалам приписаны осредненные коэффициенты демпфирования  $\xi$  величиной 1, 2, 3 % для стали, чугуна и бетона.

**Статический анализ.** Статические деформационные перемещения  $u_x$  отражены на рисунке 2. Для пустотелой конструкции на рисунке 2, а наблюдается неравномерный изгиб податливых стенок вправо (маркеры –3,7014 и –9,9601 мкм). Это обуславливает сдвиг траверсы вправо на –11,631 мкм. Относительно траверсы происходит перекося суппорта (пр.ч.с.) в направляющих по X, а относительно суппорта перекашивается ползун. В результате ползун существенно поворачивается как жесткий рычаг (различия маркеров –12,212 и –41,403 мкм). На конце шпинделя перемещение достигает –47,035 мкм.

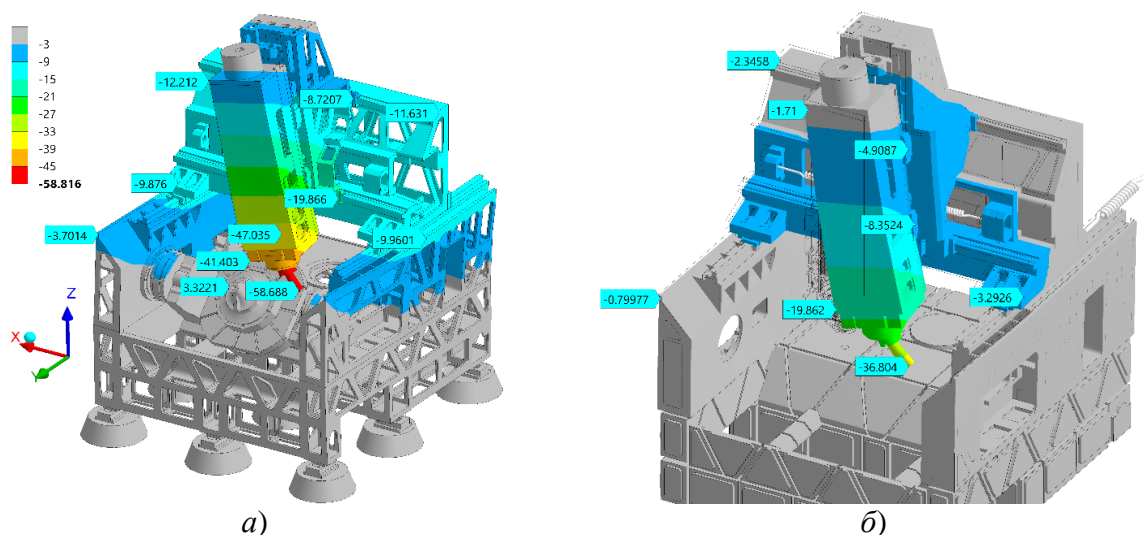


Рис. 2. Деформационные перемещения  $u_x$  (мкм) под действием силы  $F_x = 1$  кН: а – ПЧ;  $\times 8000$ ; б – ЧБ;  $\times 12000$ ; нижние отливки скрыты)

На режущей кромке из-за изгиба самого инструмента наблюдается смещение –58,688 мкм. Это соответствует жесткости  $j_x^{ПК} = 17,03$  Н/мкм. Такая жесткость меньше станочной нормы [ $j^{norm} = 20$  Н/мкм]. Следовательно, пустотелый ТФС слишком податлив. Он будет склонен к неточностям обработки и возбуждению грубых автоколебаний.

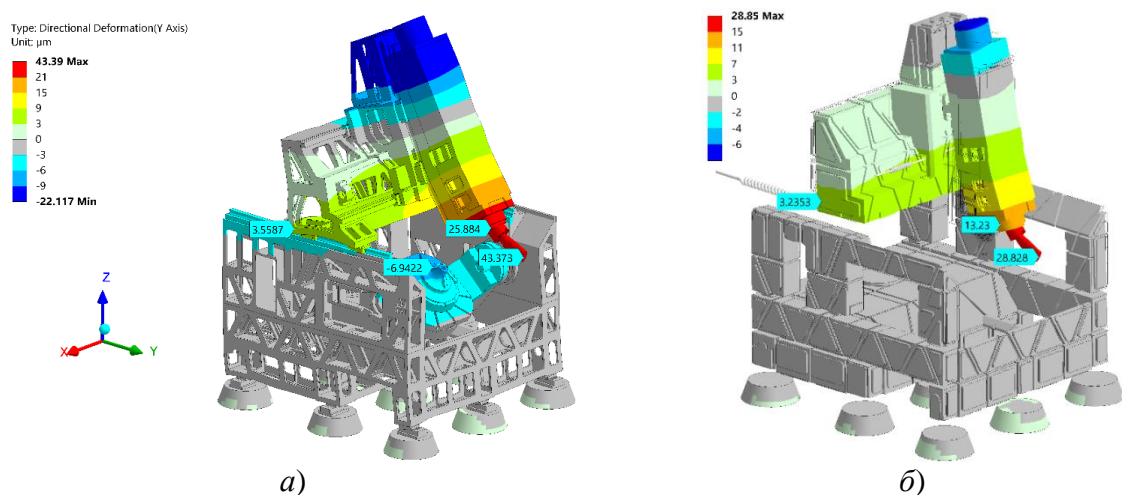


Рис. 3. Перемещения по оси Y (мкм;  $\times 20000$ ) для несущих систем: а – пустотелой (ПЧ); б – бетонированной (ЧБ; большинство СД скрыто)

Полное бетонирование (ЧБ) дает эффект (рисунок 2, б). Усиленные бетоном внутри и снизу стенки почти неподвижны ( $-0,9977$  мкм). Сдвиг траверсы вправо минимален ( $-2,3458$  мкм). Сохраняется, однако, двойной перекося в цепочке траверса – суппорт – ползун. Он обусловлен направляющими – их компоновкой и податливостью. На ШТ перемещение составляет только  $-19,862$  мкм (по сравнению с  $-41,403$  мкм для ПЧ). Происходит удвоение жесткости (таблица 1) и выход ее на допустимый уровень.

Обратим внимание, что нагружение обрабатываемой детали дает малые отклонения ( $3,3221$  мкм на рисунке 2, а). Следовательно, жесткость глобусного стола достаточна. Его усиление не является первоочередной задачей.

В направлении Y сила на шпинделе  $F_y = 1$  кН приводит к повороту ползуна в плоскости YZ (рисунок 3). Шпиндельный торец отклоняется на  $25,884$  мкм для пустотелой НС (рисунок 3, а). Отчасти это связано с изгибом ползуна. Но ведущей причиной является кручение пустотелой податливой траверсы.

При усилении траверсы бетоном (рисунок 3, б) ползун меньше отклоняется от вертикали. Перемещение  $u_{y}^{шт}$  падает до  $13,23$  мкм. Жесткость возрастает в 1,95 раза (таблица 1).

Главным здесь является увеличение крутильной жесткости траверсы. Однако, разместить утяжеленную траверсу на податливых пустотелых стенках динамически рискованно. Этим обусловлено полное бетонирование (ЧБ).

В таблице 1 дана сводка жесткостей шпиндельного торца по всем направлениям для всех СВ. Получается, что направление X всегда является более податливым, чем Y и Z. Различие колеблется в интервале 1,54–1,96 раз. Наибольшую жесткость станок показывает по вертикали, в направлении Z.

Главный вывод из таблицы 1 – полное бетонирование (ЧБ) эффективно. Оно удваивает статическую жесткость по каждому направлению.

Таблица 1 – Жесткость на шпиндельном торце  $j_{x,y,z}^{шт}$  (Н/мкм)

Структурный вариант	Направление		
	X	Y	Z
ПЧ	24,15	38,63	47,35
БТСС	29,33	45,37	49,88
ЧБ	50,35	75,58	95,97
Рост жесткости на переходе ПЧ – ЧБ	208 %	195 %	203 %

Промежуточный вариант бетонирования *БТСС* (усилены станина и суппорт) в статике малоэффективен. Он дает рост жесткости на 21% в направлении *X*. Это происходит благодаря лучшей поддержке стенок снизу. Бетонирование суппорта – полезная, но второстепенная мера. Чугунная отливка суппорта и в пустотелом состоянии достаточно жестка.

**Модальный анализ.** Обнаружено, что в диапазоне от 0 до 100 Гц несущей системе станка свойственны 7 устойчивых резонансных мод.

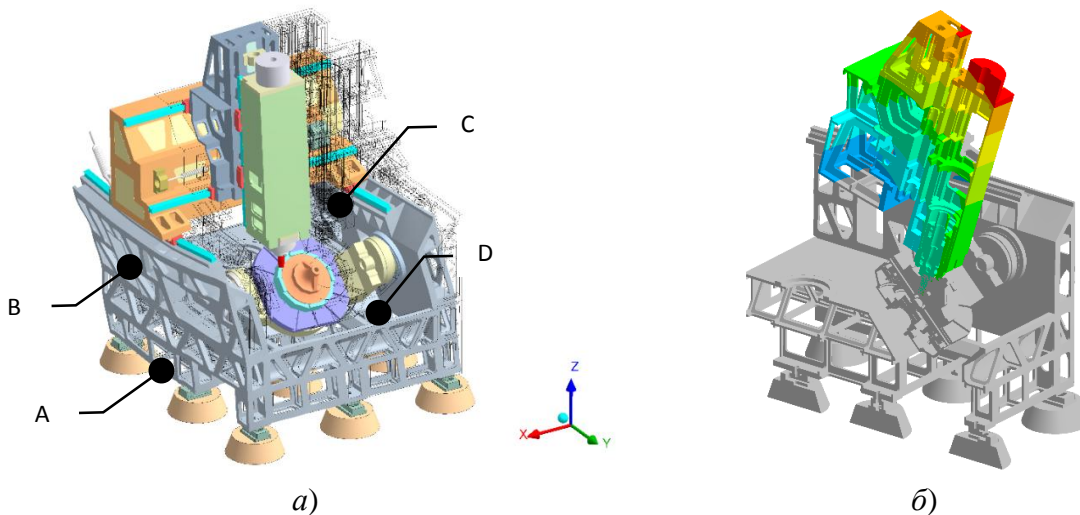


Рис. 4. Нижние резонансы: *a* – параллелограммный (*ABCD*) изгиб стенок по *X* (*Walls*; 19,5 Гц); *б* – кручение траверсы и клевки ползуна (*Tors1*; 27,9 Гц)

Их можно разделить на группы *Mx* (моды *Walls*, *Pend sy*, *Yaw*, *Pend an*) и *Myz* (моды *Tors1*, *Tors2*, *Tors3*). Моды *Mx* возбуждаются компонентами силы резания в направлении *X*. Моды *Myz* возбуждаются как с направления *Y*, так и с направления *Z*. Кроссинг колебаний между группами невелик.

Нижний резонанс станка *Walls* (рисунок 4, *a*) заключается в синхронных изгибах стенок (параллелограмм *ABCD*), что влечет колебания вдоль *X* траверсы, суппорта, ползуна и инструмента. Данному резонансу соответствуют пики *Walls* на АЧХ на рисунке 6. Моду *Walls* можно понимать, как колебания углов параллелограмма – портала *ABCD*, образованного стенками и траверсой. Рисунок 4, *a* подчеркивает опасность бетонирования траверсы при пустотелых стенках.

Все три моды группы *Myz* являются торсионными. Они связаны с кручением траверсы вокруг оси, параллельной *X* (рисунок 4, *б*). Торсионные моды визуально подобны друг другу и включают клевки ползуна. Различия связаны с местоположением оси кручения. В исходном варианте *ПЧ* особенно мощной является мода *Tors2*. Ей соответствует самый высокий пик на АЧХ по *Y* на рисунке 7.

В группе мод *Mx* на частотах выше 55 Гц обнаружена триада подобных друг другу мод, характеризующаяся двумя согласованными по фазе движениями. Одним движением является рыскание (*yawing*) траверсы – суппорта – ползуна в плоскости *XY*. Вторым движением оказывается колебание ползуна, как маятника (*pendulum*) в плоскости *XZ* (центр *O* на рисунке 5).

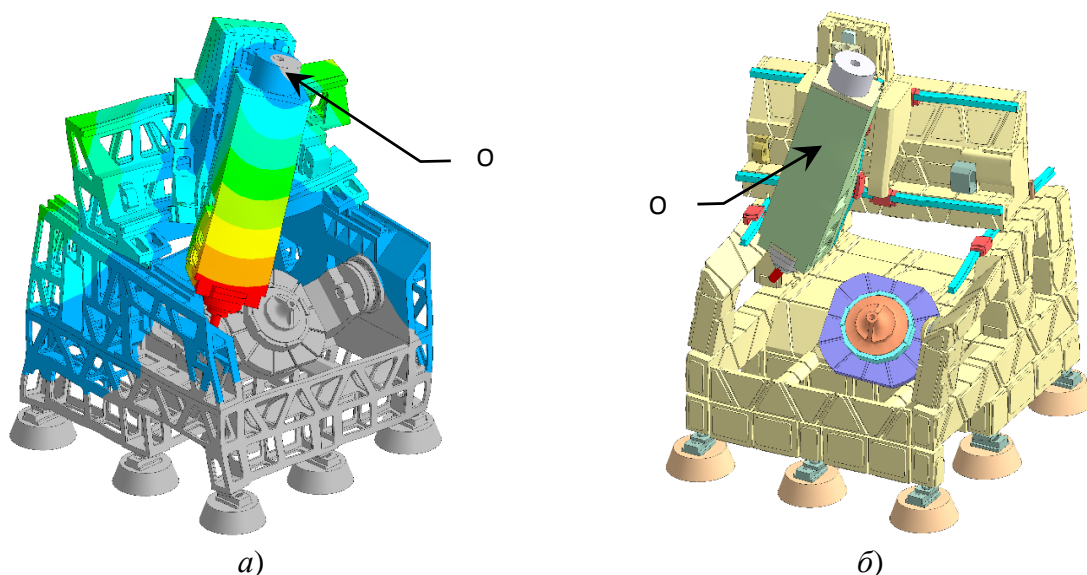


Рис. 5. Среднечастотные резонансы станка: *а* – рыскание ползуна в XY (мода *Yaw*; 68,1 Гц) (ПЧ); *б* - антифазный (*Pend an*, 104,2 Гц), (ЧБ)

В обсуждаемой триаде (обозначим ее как *Pend-Yaw*) одна из мод имеет доминирующим движением рыскание. Поэтому как отмечена (рисунок 5, *а*) как *Yaw*. В двух других модах ведущим является раскачивание «маятника – ползуна». Оно сопровождается или синфазным качанию изгибом стенок (мода *Pend sy*), или антифазным (балансирующим) изгибом стенок (мода *Pend an*; рисунок 5, *б*). Триада пиков мод *Pend-Yaw* хорошо видна в правой части АЧХ на рисунке 6.

**Гармонический анализ.** При гармоническом анализе силы на детали и инструменте осциллировали в противофазе с амплитудой в 1 кН. АЧХ были построены в диапазоне от 1 до 110 Гц с шагом в 1 Гц. Для направлений X и Y они даны на рисунке 6 и 7. АЧХ для направления Z показывает те же эффекты, что и АЧХ по Y. Для каждой точки ордината является амплитудой колебаний ШТ. Раскачка НС через ползун более интенсивна, чем через глобусный стол.

АЧХ по X (рисунок 6) показывает, что для пустотелого станка (ПЧ) опасны два пика: *Walls A* (22 Гц) и *Yaw A* (68 Гц). *Бетонирование по низу (БТСС)* ослабляет по амплитуде и сдвигает вверх по частоте только первый из них (*Walls B*). Из-за утяжеления суппорта бетоном пик *Yaw B* даже перемещается (без ослабления) вниз на частоту 64 Гц.

*Полное бетонирование (ЧБ)* ослабляет резонанс станка *Walls C* в 2,33 раза и смещает его вверх на частоту 36 Гц. В триаде резонансов *Pend-Yaw* происходит перераспределение возбуждаемости. Ведущим становится пик *Pend C sy* (84 Гц). Он слабее исходного пика *Yaw A* в 1,66 раза. Дальнейшее ослабление пиков *Pend-Yaw* можно осуществить переходом на двойные параллельные привода подачи суппорта, а также расширением опорной базы ползуна.

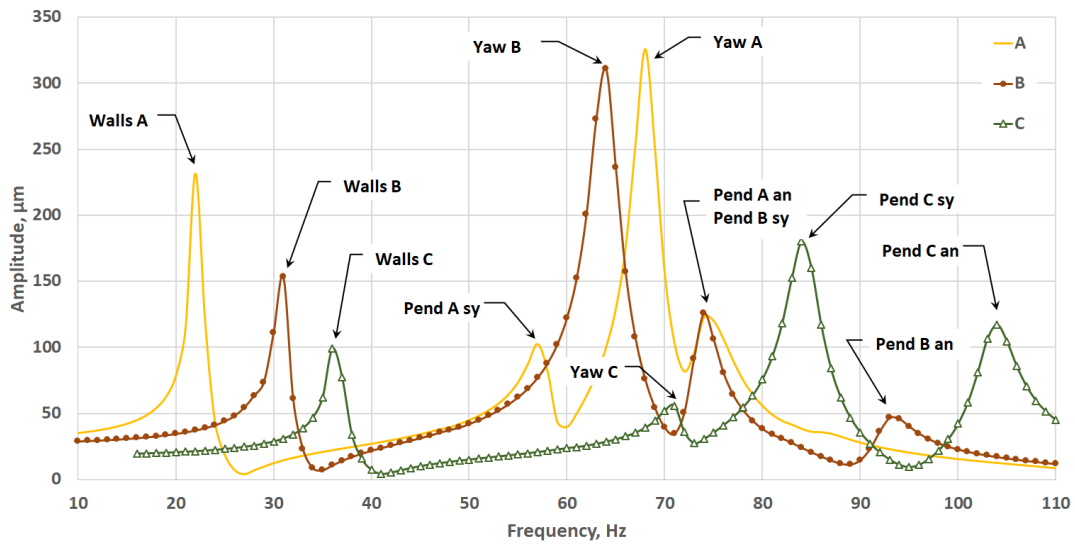


Рис. 6. АЧХ шпиндельного торца в направлении X для вариантов ПЧ, БТСС и ЧБ (линии А, В, С соответственно)

Кривые на рисунке 7 показывают возбуждение крутильных резонансов траверсы. Нижний резонанс *Tors1 A* в пустотелом станке (ПЧ) слаб в направлении Y (действует по Z). Основную опасность вдоль Y представляет пик *Tors2 A*. Из-за него на частоте 47 Гц динамическая жесткость падает до 3,7 Н/мкм. Это несовместимо с точным резанием.

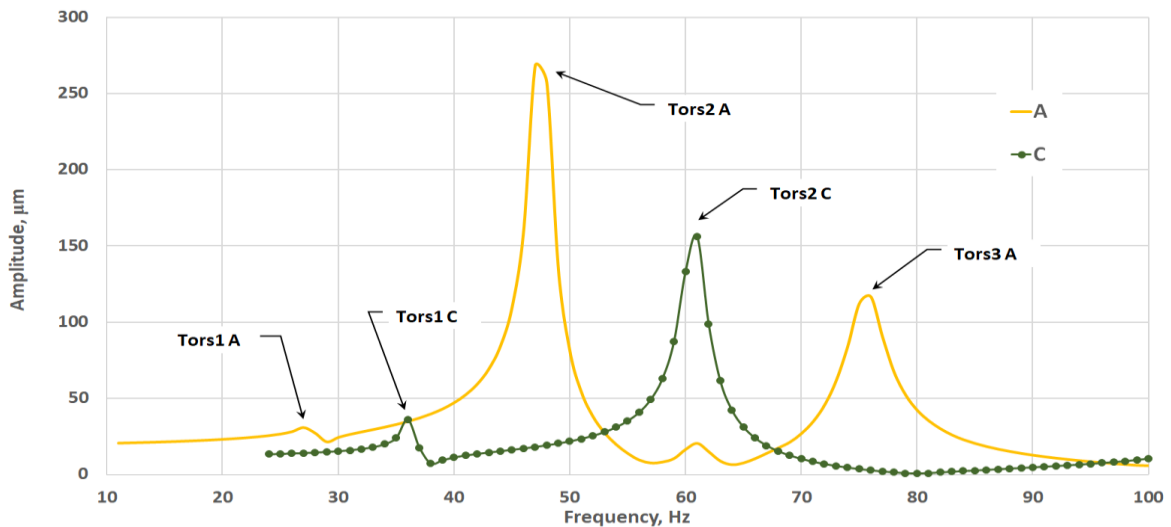


Рис. 7. АЧХ шпиндельного торца по Y: линии А, С – варианты ПЧ, ЧБ

Выходом является *полное бетонирование (ЧБ)*. Пик *Tors2 C* смещается вверх, ослабевает в 1,72 раза, но остается слишком опасным, чтобы фрезеровать на его частоте (60 Гц; жесткость только 6,4 Н/мкм). Однако, резонанс *Tors1* ослабляется и равномернее распределяется между направлениями Y и Z. Поэтому *полное бетонирование* освобождает для точной и производительной обработки частоты от 0 до 55 Гц и от 65 до 100 Гц.

### **Выводы:**

1. Станок в исходном состоянии недостаточно жестко удерживает инструмент в ползуне. Деталь на глобусном столе фиксируется на порядок жестче. Стол усиливать не нужно.
2. Бетонирование только станины (*БТСС*) почти не влияет на статическую жесткость станка и умеренно демпфирует резонансные пики. Данное решение поднимает вверх только нижний резонанс *Walls* (с 22,1 до 31 Гц).
3. Бетонирование рационально проводить для всего станка. Бетонирование по частям малоэффективно и в статическом, и динамическом плане.
4. Полное бетонирование чугунных деталей (*ЧБ*) увеличивает статическую жесткость станка примерно вдвое по каждому направлению *X, Y, Z*.
5. Полное бетонирование увеличивает динамическую жесткость: в 2,33 раза для пика *Walls*; в 1,72 раза для *Tors2*; в 1,81 раза для триады пиков *Pend-Yaw*.
6. Направление *X* является наименее жестким в станке и уступает другим направлениям в 1,82 раза. Его следует усилить при модернизации станка.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Довнар, С. С.; Авсиевич, А. М.; Колесников, Л. А.; Мищенко, Е. Ф.; Ермилова, А. А. МКЭ-моделирование 5-осевого станка // Инновации в машиностроении: 18-ая Международная науч.-техн. Конференция «Наука – образованию, производству, экономике» – Минск : БНТУ, 2021. – С. 42–46. <https://rep.bntu.by/handle/data/94525>
2. Vasilevich Y. V., Dounar S. S., Karabaniuk I. A. Finite element analysis of concrete filler influence on dynamic rigidity of heavy machine tool portal. *Science & Technique*. 2016;15(3):233-241. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-3-233-241>
3. Dounar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A. (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* 65 (137) <https://doi.org/10.17402/458>
4. Dounar, S. & Jakubowski, A. (2021) Dynamic finite element analysis of rotor-shaft fastening into a heavy precise lathe. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* 66 (138), <https://doi.org/10.17402/467>

*Поступила: 05.02.2022*