УДК 672.88.05

Разработка технологической линии по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона*

Ф.Ф. Хабибуллин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Development of a production line for lathe beds made of high-strength concrete

F.F. Khabibullin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Предложена технологическая линия по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона с применением дезинтегратора для механической активации цемента. Такая линия позволяет уменьшить вибрации при работе на высоких скоростях, а следовательно, повысить скорость обработки, снизить количество брака и создать возможность обработки деталей с большей точностью. Обоснована необходимость применения в качестве базового механизма привода дезинтегратора пространственного 4R механизма. Разработан экспериментальный дезинтегратор ДИД 2.4-0.7, а также его промышленный образец ДИД 2.4-2.0 с приводами на базе пространственного 4R механизма. Для технологической линии разработаны многоразовые опалубки, модифицированы бетоносмеситель, вибросито и парогенератор. Изготовлены бетонные образцы для станин токарных станков, проведены их испытания, которые показали прочность на сжатие более 114,2 МПа, что отвечает заданным требованиям. Приведены результаты анализа влияния параметров привода на производительность и качество механической активации цемента. Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение режимов механической активации под различные составы сверхпрочного бетона.

EDN: LMJJPV, https://elibrary/lmjjpv

Ключевые слова: технологическая линия, станины токарных станков, сверхпрочный бетон, экспериментальный дезинтегратор, промышленный дезинтегратор

The need to develop lathe beds made of ultra-high-strength concrete stems from the need to reduce vibrations during high-speed operation. Consequently, reduced vibrations will increase machining speed, reduce defects, and enable greater precision machining. The aim of this study is to develop a production line for ultra-high-strength concrete lathe beds using a disintegrator for mechanical activation of cement. To achieve this goal, the following tasks were solved: a technological requirement for mechanical activation of cement in machine tool manufacturing was formulated, a structural diagram of the production line was developed, the need to use a spatial 4R mechanism as the basic drive mechanism of the disintegrator was theoretically substantiated, and an experimental setup DID 2.4-0.7 was devel-

* Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнения научно-исследовательских работ (соглашение №15/2025-ПД-КАИ от 22.12.2025).

oped. An analysis of assembly and performance was performed, recommendations for the design of an industrial disintegrator were developed, and an industrial disintegrator DID 2.4-2.0 with drives based on a spatial 4R mechanism was developed. Individual components of the process line were developed, namely, a modified concrete mixer, vibrating screen, and steam generator, and reusable formwork for certain types of lathe beds was developed. Samples were developed and tested, yielding compression results exceeding 114.2 MPa, which fully meets the requirements of the manufacturer and buyer of lathe beds made of ultra-high-strength concrete. The results of an analysis of the influence of drive parameters on the productivity and quality of mechanical activation of cement are presented. It should be noted that a promising direction for further research is to refine mechanical activation modes for various ultra-high-strength concrete compositions.

EDN: LMJJPV, https://elibrary/lmjjpv

Keywords: technological line, lathe beds, heavy-duty concrete, experimental disintegrator, industrial disintegrator

Постановка задачи и формирование технологического запроса. Развитие станкостроения, переход к высокоточной обработке и повышенным требованиям по стабильности геометрической точности изделий обусловили необходимость поиска новых конструктивных решений для силовых элементов токарных станков, в том числе станин. Применение сверхпрочного бетона в качестве материала станины позволяет сочетать высокую прочность и жесткость с развитой демпфирующей способностью, однако реализация этих достоинств напрямую связана с качеством структуры цементного камня.

Анализ технологий производства бетонных изделий показал, что традиционные схемы приготовления бетонной смеси, основанные на обычном перемешивании компонентов, не обеспечивают требуемую степень диспергирования и активации цемента для получения однородной мелкопористой структуры сверхпрочного бетона. При этом именно степень механической активации вяжущего в значительной мере определяет скорость и полноту протекания процессов гидратации, формирование прочностных характеристик и эксплуатационных свойств станины.

В связи с этим сформирован технологический запрос на разработку специализированного устройства для механической активации цемента, которое можно встроить в непрерывную технологическую линию по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона. Такое устройство должно обеспечивать интенсивное многократное воздействие на частицы цемента при контролируемых энергозатратах и стабильность режима работы в условиях поточного производства.

Цель работы — проектирование и разработка технологической линии по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона с применением механической активации цемента.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- разработка структурной схемы технологической линии;
- теоретическое обоснование параметров дезинтегратора;
- проектирование и изготовление экспериментального и промышленного образцов дезинтегратора;
- экспериментальные исследования и обсуждение результатов;
- анализ влияния конструктивных параметров.

Разработка структурной схемы технологической линии. Исходя из требований к производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона, сформирована структурная схема технологической линии, где дезинтегратор выступает одним из основных звеньев, как показано на рис. 1.

Технологическая линия включает в себя участок приема и хранения исходных компонентов (цемента, заполнителей, минеральных и химических добавок); дезинтегратор для механической активации цемента; смесительный узел для приготовления бетонной смеси заданной подвижности; участок формования станин (формы, виброоборудование, при необходимости, вакуумирование); участок выдержки и термовлажностной обработки изделий; участок контроля качества готовых станин и склад готовой продукции.

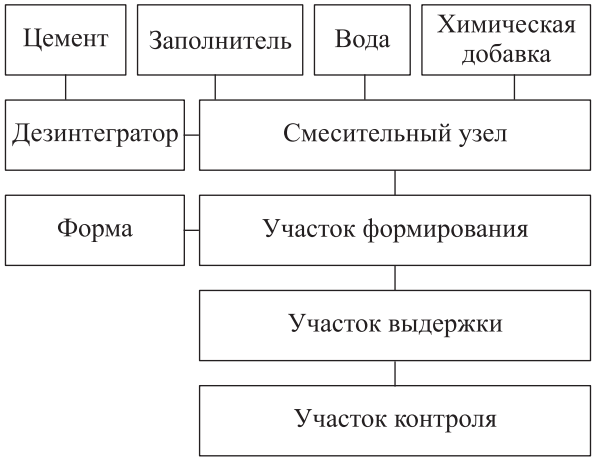


Рис. 1. Структурная схема технологической линии

Теоретическое обоснование параметров дезинтегратора. Анализ механизмов на основе стандартных приводов [1–4] показал, что повышение точности передачи вращательного движения от электродвигателя к рабочему органу (РО) [5–9], в случае дезинтегратора к одному или двум вращающим деталям, имеющим форму диска или конуса, достаточно неточная. Например, при применении ременной передачи происходит проскальзывание ремня, что не дает возможность создать необходимый процесс механической активации в рабочей камере.

В связи с этим для дезинтегратора выбран привод на основе пространственного 4R механизма, позволяющий передавать вращательное движение от двигателя к РО дезинтегратора [10–13]. Еще одним критерием выбора этого механизма для привода дезинтегратора является возможность создания синусоидального закона движения РО [14–17], которая позволяет повысить производительность за счет появления ускорения, и, соответственно, дополнительных сил дробления в результате изменения угловой скорости РО.

Зависимости угловой скорости ω и углового ускорения ε ведомого кривошипа от времени t приведены на рис. 2. Следует отметить, что в приводах на базе пространственного 4R механизма изменение закона движения ведомого кривошипа зависит от угла скрещивания осей шарниров кривошипа α_1. Например, если угол скрещивания осей шарниров кривошипа α_1 = = 15°, то максимальная угловая скорость будет равна 16 рад/с, а максимальное угловое ускорение — 62 рад/с^2.

В дезинтеграторе с целью повышения производительности использована конструкция «РО внутри РО» [18–20], где внутренний РО приводится во вращение от верхнего привода, а внешний РО — от нижнего привода.

На основе анализа процесса измельчения и механической активации фракций цемента подобраны модификации пространственного 4R механизма, со следующими углами скрещивания осей шарниров: для верхнего РО α_1 = 15°, α_2 = 90°, α_3 = 15°, α_4 = 90°; для нижнего РО — α_1 = –15°, α_2 = 90°, α_3 = –15°, α_4 = 90°. Для вращения нижнего РО углы скрещивания осей шарниров кривошипов взяты с отрицательным

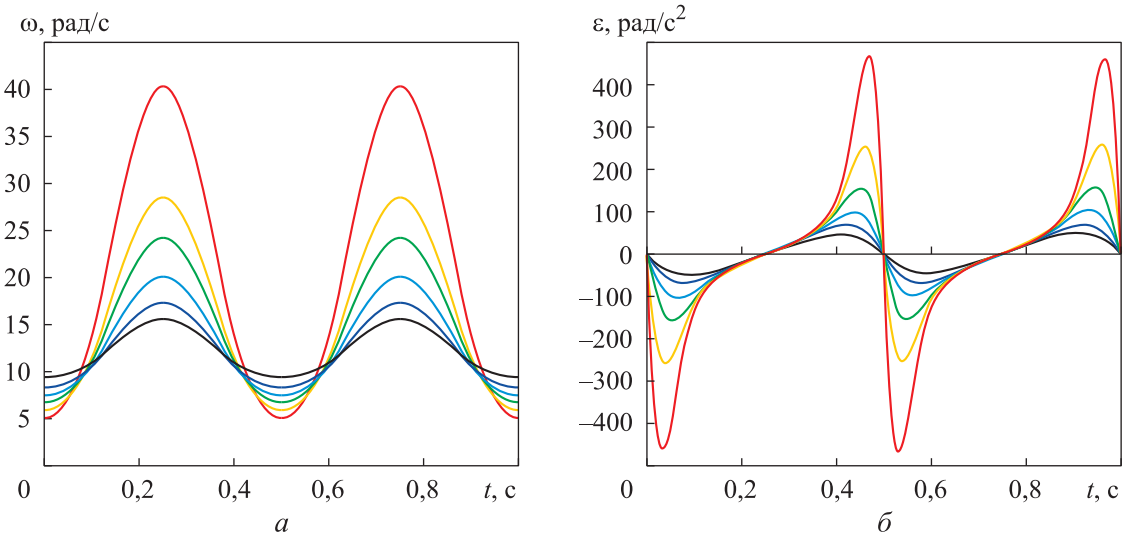
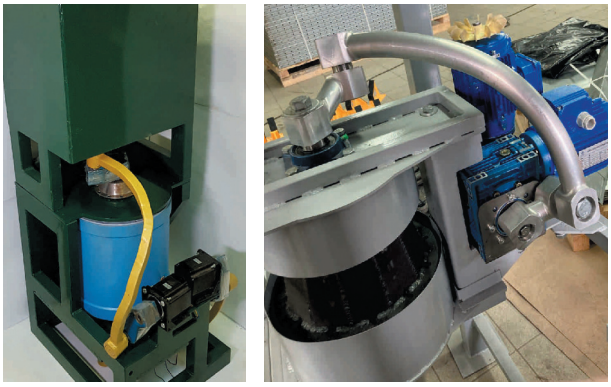


Рис. 2. Зависимости угловой скорости ω (*а*) и углового ускорения ведомого кривошипа ε (*б*) дезинтегратора от времени t при угле скрещивания осей шарниров кривошипа α_1 = 15 ( ), 20 ( ), 30 ( ), 40 ( ), 50 ( ) и 60° ( )

знаком, для вращения внешнего РО — в противоположном направлении относительно внутреннего РО с целью повышения производительности установки. Длины звеньев верхнего и нижнего приводов одинаковые и подобраны исходя из диаметра внешнего РО d_1: $l_1 = l_3 = 77{,}64$ мм,; $l_2 = l_4 = 300$ мм.

Проектирование и изготовление экспериментального и промышленного образцов дезинтегратора. На основе результатов теоретического анализа разработана конструктивная схема дезинтегратора. Определены компоновка узлов, расположение входного и выходного патрубков, конструкции рабочей камеры и опорных подшипниковых узлов. Особое внимание уделено обеспечению жесткости корпуса и точности взаимного расположения осей вращения кривошипов, что критично для стабильности кинематических параметров.

Для подтверждения возможности собираемости и работоспособности измельчительного устройства с приводами на базе пространственного 4R механизма разработан экспериментальный образец дезинтегратора ДИД 2.4-0.7 (рис. 3, *а*) [21]. Проведенные исследования показали, что разработанные приводы дают необходимый закон движения РО, а следовательно, закон измельчения в рабочей камере соответствует требуемым параметрам для механической активации цемента.

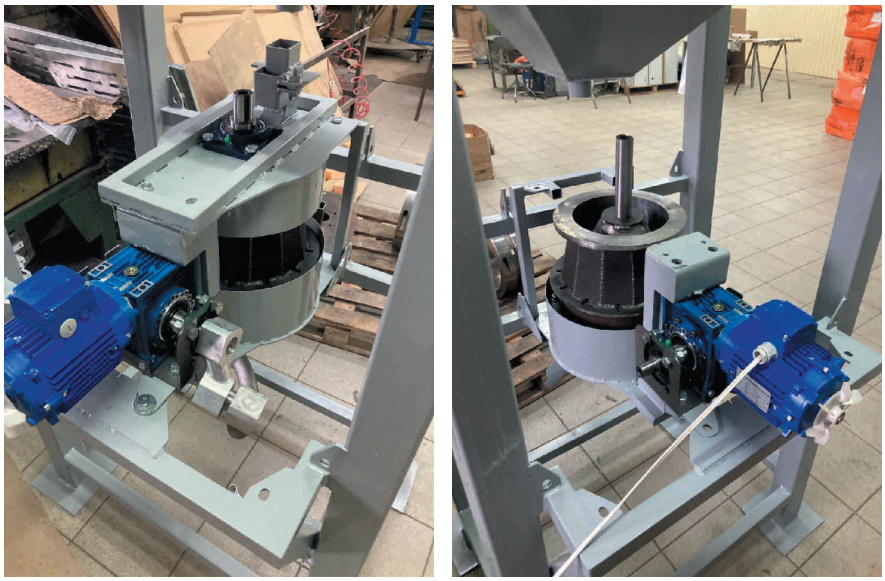


а *б*

Рис. 3. Внешний вид экспериментального ДИД 2.4-0.7 (*а*) и промышленного ДИД 2.4-2.0 (*б*) образцов дезинтегратора

Промышленный образец дезинтегратора ДИД 2.4-2.0 (рис. 3, *б*) также состоит из двух электродвигателей — верхнего и нижнего приводов, разработанных на базе пространственного 4R механизма. Конструкция промышленного дезинтегратора разработана уже по техническим требованиям технологической линии, включая производительность, высоту загрузочного и выгрузочного желобов, а также объем бункера.

Промышленный дезинтегратор ДИД 2.4-2.0 содержит следующие основные элементы: приводной электродвигатель с системой передачи вращения на ведущий кривошип (рис. 4, *а*), кривошипно-шатунный механизм с РО



а *б*

Рис. 4. Внешний вид основных узлов промышленного дезинтегратора ДИД 2.4-2.0:
а — приводного электродвигателя с системой передачи вращения на ведущий кривошип;
б — кривошипно-шатунного механизма с РО

(рис. 4, *б*), рабочую камеру с загрузочным и разгрузочными устройствами и опорные узлы, обеспечивающие заданную точность и жесткость.

Собранный промышленный дезинтегратор прошел проверку на холостом ходу по 10 ч в день в течение двух недель, после чего проведены испытания с реальной цементной нагрузкой для оценки работоспособности и устойчивости режима. Исследования промышленного дезинтегратора ДИД 2.4-2.0 при работе на холостом ходу выявили небольшие вибрации в корпусе установки вследствие изменения центра масс механизма привода в процессе вращения, однако зазоры между соседними шарнирами кинематической пары не изменились, как и температура в кинематических парах.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов. Основываясь на структурной схеме технологической линии (см. рис. 1), были закуплены стандартные комплектующие и разработаны составляющие установки для технологической линии по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона.

В состав технологической линии входит следующее основное оборудование:

• дезинтегратор ДИД 2.4-2.0, предназначенный для механической активации, производительностью до 0,7…2,0 т/ч (рис. 5, *а*);

• бетоносмеситель EUROMIX 600.500, модифицированный по высоте и желобу подачи готового материала (рис. 5, *б*);

• многоразовая опалубка, разработанная под определенный вид станины токарного станка (рис. 5, *в*);

• вибростол ВИ-107НБ (рис. 5, *г*);

• электродный парогенератор, модифицированный под размеры станин токарных станков (рис. 5, *д*);

• станина токарного станка из сверхпрочного бетона (рис. 5, *е*).

Как показали многократные испытания, особенность разработанной технологии заливки сверхпрочного бетона в специализированные опалубки заключается в необходимости вибрации сверхпрочного бетона в форме при заливке. Схема расположения бетоносмесителя относительно вибростола показана на рис. 6.



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 5. Внешний вид основного оборудования технологической линии:
а — дезинтегратор ДИД 2.4-2.0; *б* — бетоносмеситель EUROMIX 600.500; *в* — многоразовая опалубка; *г* — вибростол ВИ-107НБ; *д* — электродный парогенератор; *е* — станина токарного станка из сверхпрочного бетона

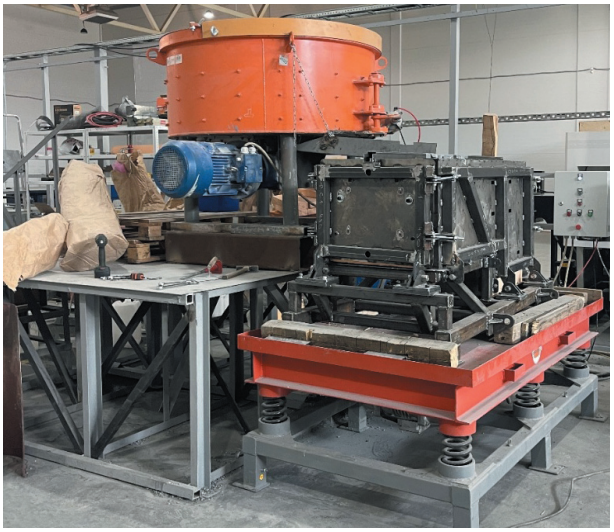


Рис. 6. Схема расположения бетоносмесителя относительно вибростола

В рамках программы испытаний были подготовлены серии бетонных образцов и опытные станины, изготовленные как по базовой технологии без механической активации цемента, так и по разработанной технологии с использованием дезинтегратора.

Образцы, полученные по различным схемам, подвергались испытаниям на прочность и оценке структуры. По результатам испытаний установлено, что применение технологии с механической активацией цемента в дезинтеграторе вместо базовой технологии позволяет повысить однородность структуры цементного камня, уменьшить количество крупных пор и дефектов, а также увеличить прочностные характеристики сверхпрочного бетона.

В целях определения показателей бетона для изготовления станин токарных станков проведены испытания полученных из него образцов в организации «Испытательная лаборатория «Качество в строительстве» (номер по журналу 7и №522), результаты которых зафиксированы в протоколе испытаний №522-7и от 17 декабря 2024 г. После испытаний при температуре 21°C и относительной влажности воздуха 57 % получены результаты, приведенные в таблице.

Из таблицы следует, что технологическая линия дает возможность изготавливать станины с прочностью на сжатие 92,7…97,1 МПа, что соответствует марке бетона М1000 и классу бетона по прочности В75 (по ГОСТ 26633–2015). У стандартных изделий из такого цемента без механической активации прочность на сжатие равна 57,8 МПа. Следовательно, при соблюдении технологии изготовления станин токарных станков в технологической линии из сверхпрочного бетона механическая активация позволяет повысить показатель прочности на сжатие на 60 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанное оборудование и технологическая схема обеспечивают требуемое качество бетонной смеси и изделий, а также подтверждают корректность теоретических расчетов кинематических параметров РО дезинтегратора.

Анализ влияния конструктивных параметров дезинтегратора. Увеличение длины ведущего кривошипа при фиксированном межосевом расстоянии приводит к росту амплитуды углового перемещения ведомого звена и увеличению неравномерности его вращения. На рис. 2 это проявляется в более выраженных участках ускоренного и замедленного движения ведомого кривошипа в течение цикла. При этом возрастает максимальное угловое ускорение, что означает усиление ударно-динамического воздействия РО на частицы цемента в рабочей камере. С одной стороны, это способствует интенсификации процесса механической активации за счет более высоких локальных нагрузок и многократного перераспределения частиц. С другой — чрезмерное увеличение длины кривошипа приводит к росту динамических нагру-

Результаты испытаний

Номер образца	Дата испытания	Возраст образца, сут	Размеры образца, мм	Средняя плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа
2717/1	10.10.2024	35	70×70×70	2608	97,1/114,2
2717/2	17.10.2024	35	70×70×70	2579	92,7/109,0
2717/3	17.10.2024	35	70×70×70	2570	93,0/109,4

Примечание. В числителе дроби указаны значения с учетом масштабного коэффициента $\alpha = 0{,}85$ (по ГОСТ 10180–2012), в знаменателе — без его учета.

зок на элементы механизма, повышенному износу подшипников и увеличению энергоемкости процесса, что ограничивает целесообразный диапазон этого параметра.

Таким образом, длина ведущего кривошипа и межосевое расстояние определяют компромисс между степенью интенсификации процесса механической активации и допустимыми динамическими нагрузками на элементы дезинтегратора. Анализ расчетных графиков позволил выделить рациональные диапазоны конструктивных параметров привода, при которых достигается требуемая интенсивность механической активации с приемлемыми эксплуатационными характеристиками дезинтегратора.

Выводы

1. Разработана технологическая линия по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона с использованием механически активированного цемента. Основным звеном линии является дезинтегратор, обеспечивающий требуемый уровень механической активации фракций цемента и позволяющий целенаправленно формировать структуру цементного камня.

2. На основе кинематического анализа пространственного 4R механизма получены зависимости угловых скоростей и ускорений ведомого звена от конструктивных параметров механизма. Проанализировано влияние длины кривошипов и межосевого расстояния на характер движения РО, что позволило выделить рациональные диапазоны конструктивных параметров, обеспечивающие эффективный процесс механической активации цемента.

3. Выполнено проектирование, 3D-моделирование и поэтапное изготовление экспериментального и промышленного дезинтеграторов: от проверки компоновочных решений до изготовления металлической конструкции и сборки промышленного дезинтегратора. Испытания подтвердили работоспособность предложенной конструкции, стабильность режима работы и возможность регулирования параметров активации в заданных пределах.

4. Результаты экспериментальных исследований бетонных образцов и опытных станин подтвердили, что применение технологии с механической активацией цемента в дезинтеграторе вместо базовой технологии способствует улучшению однородности структуры цементного камня и повышению прочностных характеристик сверхпрочного бетона. Установлено, что у станин, полученных с применением механической активации прочность на сжатие (92,7…97,1 МПа) на 60 % выше, чем у станин, изготовленных по базовой технологии (57,8 МПа).

5. Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение режимов механической активации под различные составы сверхпрочного бетона.

Литература

[1] Макарова Е.А., Ветлицын М.Ю., Шаронов Н.Г. Адаптивные захваты робототехнических систем. *Известия ВолГТУ*, 2023, № 4, с. 57–63, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-4-275-57-63

[2] Глазунов В.А., Ларюшкин П.А., Шалюхин К.А. и др. Структура, кинематика и прототипирование параллельного манипулятора с удаленным центром вращения. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2023, № 6, с. 54–61, doi: https://doi.org/10.31857/S0235711923060081

[3] Глазунов В.А., Скворцов С.А., Ковалева Н.Л. и др. Решение задачи о скоростях и положениях для модифицированного механизма ротопода с четырьмя кинематическими цепями. *Станкоинструмент*, 2025, № 3, с. 68–71, doi: https://doi.org/10.22184/2499-9407.2025.40.3.68.71

[4] Глазунов В.А., Левин С.В., Шалюхин К.А Разработка электромеханических манипуляторов на основе постоянных магнитов. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2025, № 2, с. 70–75, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2025_2_70

[5] Дворников Л.Т. В доказательство состоятельности опыта структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 44–48.

[6] Воробьева Н.С., Несмиянов И.А., Дяшкин А.В. и др. Робототехнический комплекс для возделывания овощных культур. *Известия ВолГТУ*, 2024, № 4, с. 41–44, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-4-287-41-44

[7] Ларюшкин П.А., Хрестина А.А., Синицына Ю.В. и др. К вопросу структурного синтеза кинематических цепей сферических механизмов параллельной структуры с линейными приводами. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2025, № 2, с. 3–11.

[8] Захаров М.Н., Ларюшкин П.А., Семенов А.В. Решение обратной задачи о положениях кинематически избыточного гибридного механизма параллельной структуры. *Вестник машиностроения,* 2024, т. 103, № 9, с. 739–743.

[9] Антонов А.В., Ларюшкин П.А., Фомин А.С. Кинематический анализ нового пятиподвижного робота параллельной структуры типа «дельта». *Известия РАН. Механика твердого тела,* 2024, № 4, с. 135–149.

[10] Коловский М.З. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ. *Теория механизмов и машин*, 2003, № 1, с. 3–29.

[11] Жога В.В., Нелюбова А.В. Обоснование расчетной схемы динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью. *Известия ВолГТУ*, 2024, № 4, с. 60–65, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-4-287-60-65

[12] Жога В.В., Нелюбова А.В. Кинематический синтез аналитических законов перемещений исполнительных приводов манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 29–36. EDN: QHQDGZ

[13] Малышев А.П. Анализ и синтез механизмов с точки зрения их структуры. *Известия Томского технологического института*, 1923, т. 44, вып. 2. 95 с.

[14] Решетов Л.Н. *Конструирование рациональных механизмов*. Москва, Машиностроение, 1972. 256 с.

[15] Идрисова С.М., Марчук Е.А., Малолетов А.В. Исследование деформаций металлических башен — опор параллельного тросового робота. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2022, № 2, с. 113–123, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_2_113

[16] Марчук Е.А., Калинин Я.В., Иванов М.А. и др. О выборе математических моделей висячих элементов при проектировании крупногабаритного параллельного тросового робота. *Известия ВолГТУ*, 2022, № 9, с. 56–62, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2022-9-268-56-62

[17] Ветлицын М.Ю., Шаронов Н.Г., Малолетов А.В. и др. Разработка комплекса испытательных средств для исследования адаптивных реконфигурируемых структур. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2023, № 4, с. 99–106, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2023_4_99

[18] Merlet J.P. Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots. *J. Mech. Des.*, 2006, vol. 128, no. 1, pp. 199–206, doi: https://doi.org/10.1115/1.2121740

[19] Voglewede P., Ebert-Uphoff I. Measuring "closeness" to singularities for parallel manipulators. *ICRA*, 2004, vol. 5, pp. 4539–4544, doi: https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302433

[20] Яруллин М.Г., Галиуллин И.А. Исследование механизма Брикарда с помощью алгоритмов компьютерной графики. *Вестник технологического университета*, 2015, т. 18, № 21, с. 137–140.

[21] Мудров А.П., Хабибуллин Ф.Ф., Пикмуллин Г.В. и др. Синтез пространственных пяти- и шестизвенных механизмов с вращательными парами по движению выходного звена. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 2022, т. 17, № 2, с. 92–98, doi: https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-92-98

References

[1] Makarova E.A., Vetlitsyn M.Yu., Sharonov N.G. Adaptive grippers of robotic systems. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2023, no. 4, pp. 57–63, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-4-275-57-63 (in Russ.).

[2] Glazunov V.A., Laryushkin P.A., Shalyukhin K.A. et al. Structure, kinematics, and prototyping of a parallel manipulator with a remote center of rotation. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2023, no. 6, pp. 54–61, doi: https://doi.org/10.31857/S0235711923060081 (in Russ.).

[3] Glazunov V.A., Skvortsov S.A., Kovaleva N.L. et al. Solution of the velocity and position problem for a modified rotopod mechanism with four kinematic chains. *Stankoinstrument*, 2025, no. 3, pp. 68–71, doi: https://doi.org/10.22184/2499-9407.2025.40.3.68.71 (in Russ.).

[4] Glazunov V.A., Levin S.V., Shalyukhin K.A Development of electromechanical manipulators based on permanent magnets. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2025, no. 2, pp. 70–75, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2025_2_70 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab*., 2025, vol. 54, no. 8, pp. 889–893, doi: https://doi.org/10.1134/S1052618825700736)

[5] Dvornikov L.T. As proof of the validity of the experience of structural synthesis of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 44–48. (In Russ.).

[6] Vorobyeva N.S., Nesmiyanov I.A., Dyashkin A.V. et al. A robotic complex for the cultivation of vegetable crops. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2024, no. 4, pp. 41–44, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-4-287-41-44 (in Russ.).

[7] Laryushkin P.A., Khrestina A.A., Sinitsyna Yu.V. et al. On the issue of structural synthesis of kinematic chains of spherical mechanisms of parallel structure with linear drives. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2025, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.).

[8] Zakharov M.N., Laryushkin P.A., Semenov A.V. Inverse kinematics of a kinematically redundant hybrid parallel mechanism. *Vestnik mashinostroeniya*, 2024, vol. 103, no. 9, pp. 739–743. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res*., 2024, vol. 44, no. 11, pp. 1542–1546, doi: https://doi.org/10.3103/S1068798X24702873)

[9] Antonov A.V., Laryushkin P.A., Fomin A.S. Kinematic analysis of a novel 5-DOF delta-type parallel robot. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2024, no. 4, pp. 135–149. (In Russ.). (Eng. version: *Mech. Solids*, 2024, vol. 59, no. 4, pp. 1920–1929, doi: https://doi.org/10.1134/S0025654424603355)

[10] Kolovskiy M.Z. On some areas of modernization of the TMM course. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2003, no. 1, pp. 3–29. (In Russ.).

[11] Zhoga V.V., Nelyubova A.V. Substantiation of the computational dynamics scheme for a parallel-serial structure manipulator with additional coupling. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2024, no. 4, pp. 60–65, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-4-287-60-65 (in Russ.).

[12] Zhoga V.V., Nelyubova A.V. Kinematic synthesis of analytical laws of the actuator displacement of a manipulator with the parallel-sequential structure and additional coupling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 9, pp. 29–36. EDN: QHQDGZ (in Russ.).

[13] Malyshev A.P. Analysis and synthesis of mechanisms from the point of view of their structure. *Izvestiya Tomskogo tekhnologicheskogo instituta*, 1923, vol. 44, iss. 2. 95 p. (In Russ.).

[14] Reshetov L.N. *Konstruirovanie ratsionalnykh mekhanizmov* [Design of rational mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 256 p. (In Russ.).

[15] Idrisova S.M., Marchuk E.A., Maloletov A.V. Study of deformations of metal towers - supports of a parallel cable-driven robot. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering & Automation Problems], 2022, no. 2, pp. 113–123, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_2_113 (in Russ.).

[16] Marchuk E.A., Kalinin Ya.V., Ivanov M.A. et al. On mathematical modeling of sagging elements of large-sized parallel cable-driven robot. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2022, no. 9, pp. 56–62, doi: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2022-9-268-56-62 (in Russ.).

[17] Vetlitsyn M.Yu., Sharonov N.G., Maloletov A.V. et al. Development of a complex of testing tools for studying adaptive reconfigurable structures. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering & Automation Problems], 2023, no. 4, pp. 99–106, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2023_4_99 (in Russ.).

[18] Merlet J.P. Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots. *J. Mech. Des*., 2006, vol. 128, no. 1, pp. 199–206, doi: https://doi.org/10.1115/1.2121740

[19] Voglewede P., Ebert-Uphoff I. Measuring "closeness" to singularities for parallel manipulators. *ICRA*, 2004, vol. 5, pp. 4539–4544, doi: https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302433

[20] Yarullin M.G., Galiullin I.A. Study on the Bricard mechanism using computer graphics algorithms. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Technological University], 2015, vol. 18, no. 21, pp. 137–140. (In Russ.).
[21] Mudrov A.P., Khabibullin F.F., Pikmullin G.V. et al. Synthesis of spatial five- and six-link mechanisms with rotational pairs by the movement of the output link. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Kazan State Agrarian University], 2022, vol. 17, no. 2, pp. 92–98, doi: https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-92-98 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.12.2025

Информация об авторе

ХАБИБУЛЛИН Фаниль Фаргатович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой Машиноведения и инженерной графики. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: fanil_arsk@mail.ru).

Information about the author

KHABIBULLIN Fanil Fargatovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Department of Mechanical Science and Engineering Graphics. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: fanil_arsk@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Хабибуллин Ф.Ф. Разработка технологической линии по производству станин токарных станков из сверхпрочного бетона. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 60–69.

Please cite this article in English as:
Khabibullin F.F. Development of a production line for lathe beds made of high-strength concrete. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 60–69.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы XXX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых

«Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы (Молодой инженер)»

В сборнике представлены тезисы докладов участников XXX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы (Молодой инженер)», прошедшей в 2026 году в МГТУ им. Н. Э. Баумана при поддержке столичных вузов: НИУ МГСУ, МАДИ, МИИТ, МГАВТ. Участники конференции — преимущественно учащиеся ведущих технических вузов Москвы, а также других российских и зарубежных вузов.

Для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов технических вузов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru