

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЯТИКООРДИНАТНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ФРЕЗЕРНО-РАСТОЧНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ГИБРИДНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Досько С.И.<sup>1</sup>, Сухарев М.К.<sup>2</sup> Email: Dosko1145@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Досько Сергей Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
Институт конструкторско-технологической информатики

Российская академия наук;

<sup>2</sup>Сухарев Михаил Константинович – аспирант,  
кафедра станков,

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
г. Москва

**Аннотация:** в статье описаны результаты компьютерного имитационного моделирования кинематики и динамики пятикоординатного горизонтального фрезерно-расточного обрабатывающего центра с гибридной кинематической структурой. Компьютерные эксперименты проведены с помощью гибридной математической модели позволяющей сравнить динамические характеристики в различных точках рабочего пространства, а также пригодную для изучения кинематических свойств станка и приведены разработанные и реализованные в программной среде модели.

**Ключевые слова:** динамическая модель, упругая система, формы колебаний, критерий адекватности, АЧХ.

## SIMULATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PROPERTIES OF THE FIVE-AXIS HORIZONTAL MILLING AND BORING PROCESSING CENTRE HAVING HYBRID KINEMATIC STRUCTURE ARE PROVIDED

Dosko S.I.<sup>1</sup>, Sukharev M.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dosko Sergey Ivanovich – PHD in Philosophy, Senior Researcher,  
INSTITUTE OF DESIGN AND TECHNOLOGY INFORMATICS OF RAS;

<sup>2</sup>Sukharev Mikhail Konstantinovich – PHD Student,  
DEPARTMENT MACHINE TOOLS,

MOSCOW STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY STANKIN,  
MOSCOW

**Abstract:** the article describes the results of computer based simulation of kinematic and dynamic properties of the five-axis horizontal milling and boring processing centre having hybrid kinematic structure are provided. Computer-aided experiments were performed using hybrid mathematical model. It allows to compare dynamic properties of the various points of operating space. And it's suitable for study of the kinematic properties of the machine and the models developed and implemented in the software environment are presented.

**Keywords:** dynamic model, elastic system, vibrations, adequacy criteria, amplitude frequency characteristic.

УДК 621.914.31

**Введение.** Компьютерное моделирование является в настоящее время одним из основных способов исследования динамики сложных механических систем. Оно стало неотъемлемым этапом проектирования конструкций, оптимизации их параметров и широко применяется в различных областях науки и техники, таких как станкостроение, авиастроение, робототехника и пр.

Программы моделирования реализуют методы построения и анализа математических моделей объектов, разработанные на основе обобщённых подходов к описанию разнообразных конструктивных элементов, условий их взаимодействия и функционирования. Эффективность математических моделей определяется допущениями, которые принимаются в рамках таких подходов.

В основе современных программ, например, ADAMS (США), SIMPACK (Германия), EULER (Россия), лежит представление объекта исследований системой абсолютно твёрдых тел (СТТ), связанных посредством шарниров и силовых элементов. Подобный метод реализован также в библиотеке физического моделирования механических систем SimMechanics, позволяющей создавать модели механических объектов совместно с другими пакетами MathWorks и разрабатывать реальные прототипы систем управления.

Однако многие исследования эффективны только с учётом упругости некоторых частей конструкции, что следует учитывать при построении математической модели. Таковыми, например, является шпиндели металлорежущих станков с учётом воздействий возникающих в процессе резания [1].

Подобные задачи предполагают использование гибридных моделей, которые строятся на основе совмещения различных подходов при описании динамики конструкции.

**Задача исследования.** В данном исследовании решалась задача разработки математической модели упругой системы пятикоординатного горизонтального фрезерно-расточного обрабатывающего центра с гибридной кинематической структурой в графической среде имитационного моделирования Simulink на основе библиотеки SimMechanics. Для решения задачи моделирования был предложен метод добавления упругих частей конструкции, подверженных малым деформациям. Необходимо было получить гибридную математическую модель позволяющую сравнить динамические характеристики в различных точках рабочего пространства и пригодную для изучения кинематических свойств станка. В качестве объекта моделирования был выбран шпиндельный узел с приводами подачи.

Общий вид пятикоординатного горизонтального фрезерно-расточного обрабатывающего центра с гибридной кинематической структурой, разработанного в МГТУ «Станкин» под руководством проф. Бушуева В.В., представлен на рис. 1.

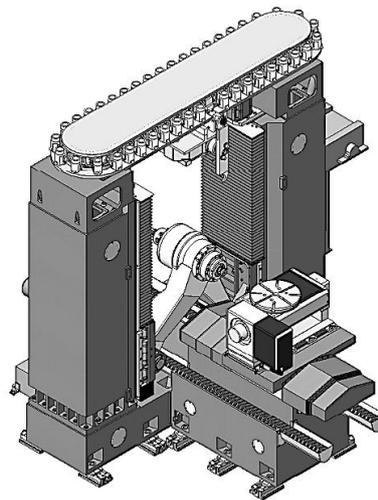


Рис. 1. Общий вид станка

**Моделирование и анализ результатов.** Расчётная схема упругой системы шпиндельного узла с приводами подачи (рис. 2) состоит из недеформируемых узлов: левая и правая штанги, корпуса шпиндельного узла и деформируемого шпинделя.

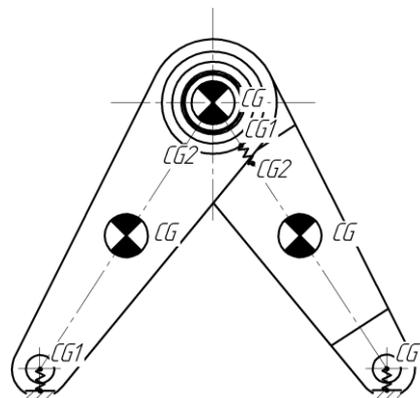


Рис. 2. Расчётная схема

При моделировании с помощью блоков SimMechanics тела модели считаются физическими телами [3] и, следовательно, левая и правая штанги с корпусом шпиндельного узла должны быть абсолютно жёсткими, т.е. отношение длины к высоте сечения должно быть меньше 8, левая и правая штанги, корпус шпиндельного узла удовлетворяют этому требованию. Подшипники представлены в виде пружин, имеющих жёсткость и коэффициент демпфирования.

Деформируемые тела считаем сплошными, однородными, изотропными и идеально упругими. Все деформации считаются настолько малыми, что не оказывают существенного влияния на взаимное расположение нагрузок приложенных к телу и соответствуют закону Гука.

Блок-схема Simulink моделирующая кинематику и динамику шпиндельного узла с приводами подачи пятикоординатного горизонтального фрезерно-расточного обрабатывающего центра с гибридной кинематической структурой показана на рис. 3 и состоит из семи основных подсистем (блоков Subsystem):

- Control System
- Left Bearing
- Right Bearing
- Verification System
- Validation System
- Spindle System
- Bearing Block

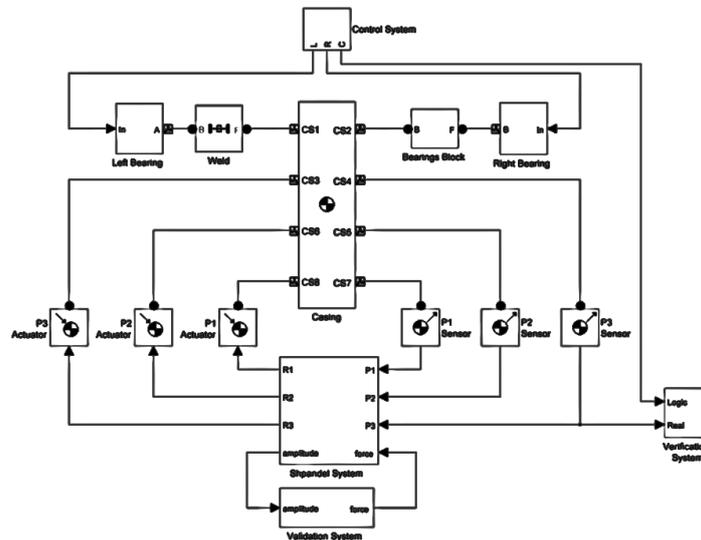


Рис. 3. Кинематическая структура станка

а также блока Casing (параметры которого: масса, тензор инерции, положение и ориентация начала координат центра тяжести тела и других систем координат тела приведены на рисунках рис. 4 а и 4 б представляющий собой блок SimMechanics Body и служащий корпусом шпиндельного узла.

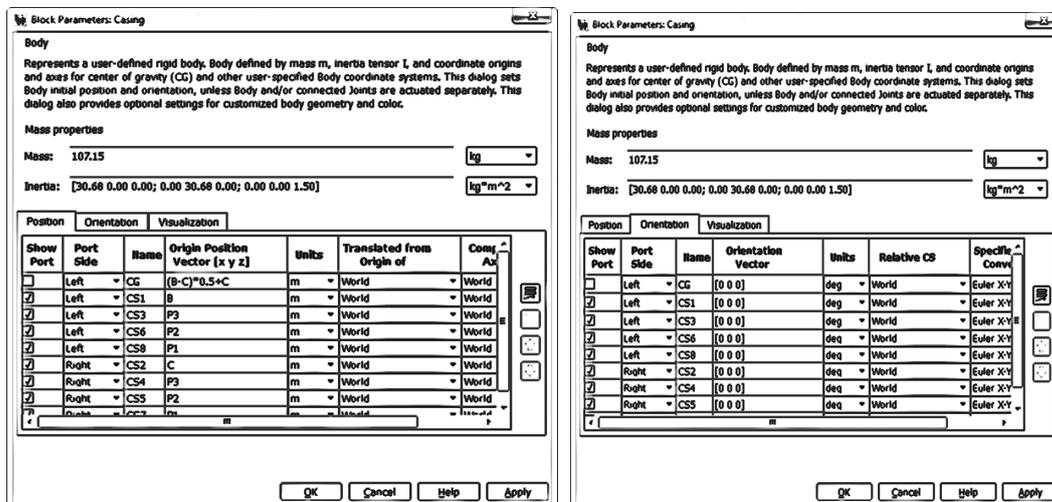


Рис. 4. Параметры блока Casing

Блок Casing жёстко закреплён с подсистемой Left Bearing с помощью блока Weld и подвижно соединён с подсистемой Right Bearing посредством подсистемы Bearing Block, которая служит набором из двух подшипников.

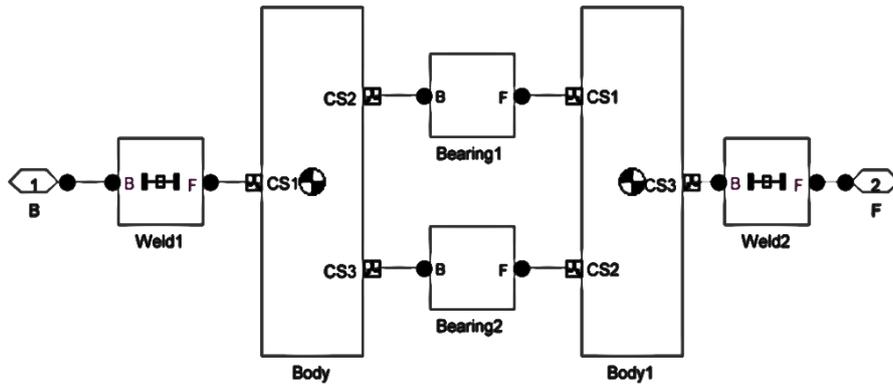


Рис. 5. Bearing Block

Подсистема Bearing Block (рис. 5) состоит из двух жёстких недеформируемых тел (Body и Body1) с нулевой массой и нулевым тензором инерции, параметры которых приведены на рисунке 6.

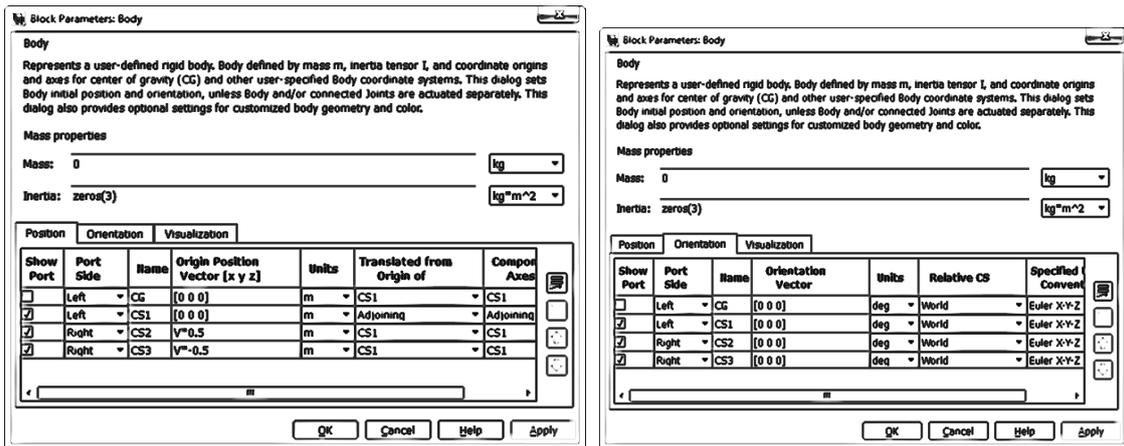


Рис. 6. Параметры блока Bearing

С внешними элементами блока Body и Body1 жёстко закрепляются при помощи блоков Weld1 и Weld2, а между собой блоки Body и Body1 подвижно закреплены посредством двух подсистем Bearing1 и Bearing2, моделирующих работу подшипников.

Каждая из подсистем Bearing1 и Bearing2 (рис. 7) состоит из соединительного элемента Bushing имеющего шесть степеней свободы.

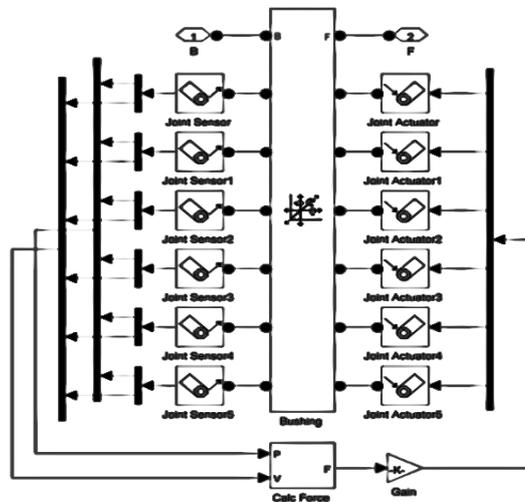


Рис. 7. Bearing 1/2

Относительные перемещения и относительные скорости соединённых тел считываются блоками Join Sensor, которые затем передаются в подсистему Calc Force. Подсистема Calc Force вычисляет реакции согласно формуле 1 [2]:

$$\{r\} = [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (1)$$

где:  $\{x\}$  и  $\{\dot{x}\}$  – векторы относительных перемещений и относительных скоростей соединённых тел.

$[K]$  и  $[C]$  – матрицы демпфирования и жёсткости подшипника.

Полученные реакции прикладываются при помощи блоков Join Activator.

Информация о пространственном положении и точках установки подшипников между шпинделем и корпусом считывается при помощи блоков Body Sensor (Рис. 3.2), и передается в подсистему Spindle System, а ответные реакции прикладываются при помощи блоков Body Activator, также в подсистему Spindle System передается возбуждающий сигнал. Подсистема Spindle System показана на рис. 8, основная логика которой сосредоточена в блоке Spindle S-Function. Реализация блока Spindle S-Function приведена в приложении 1.

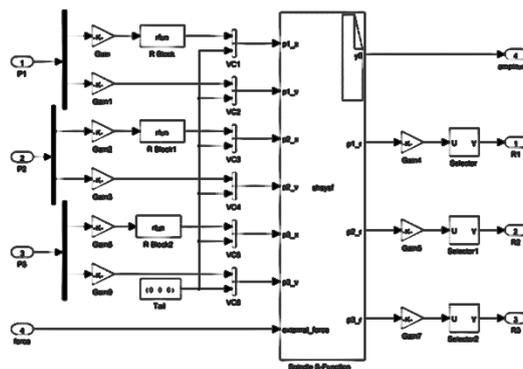


Рис. 8. Spindle System

Подсистемы Left Bearing и Right Bearing аналогичны и представляют собой штанги в сборе с башмаками перемещающимися по направляющим. Подсистема Left Bearing показана на рис. 9.

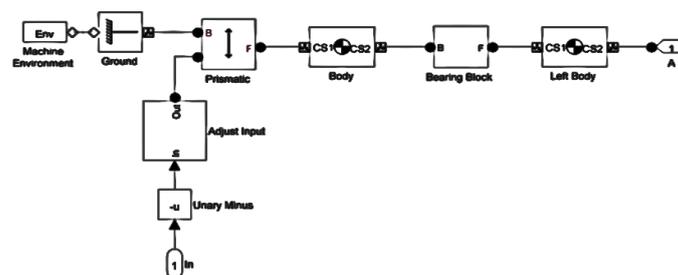


Рис. 9. Left Bearing

Подсистема Validation System служит целям анализа и оценки характеристик системы. Реализация может меняться в зависимости от проводимых вычислительных экспериментов. За расчёт пространственного положения башмаков отвечает подсистема Control System показанная на рис. 10, основная логика которой сосредоточена в блоке Signal Source.

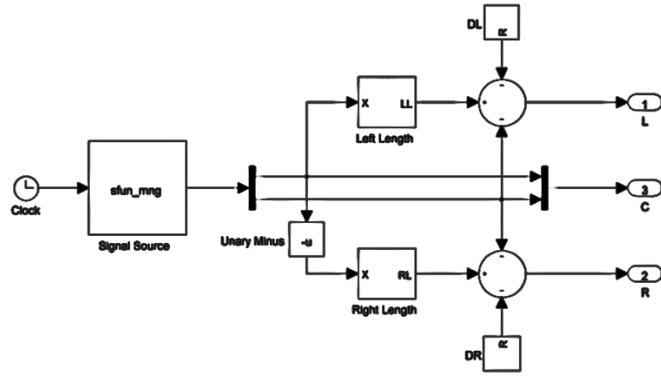


Рис. 10. Control System

В целях регрессионного тестирования была включена подсистема Verification System, приведенная на рис. 11.

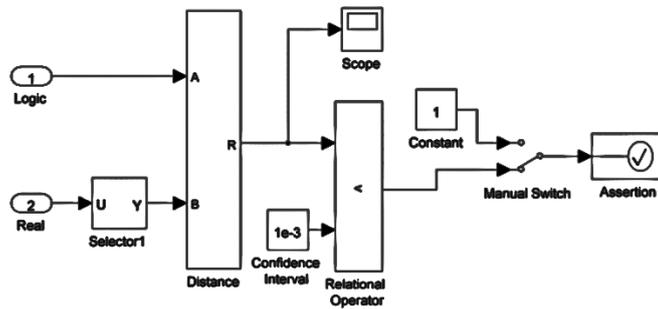
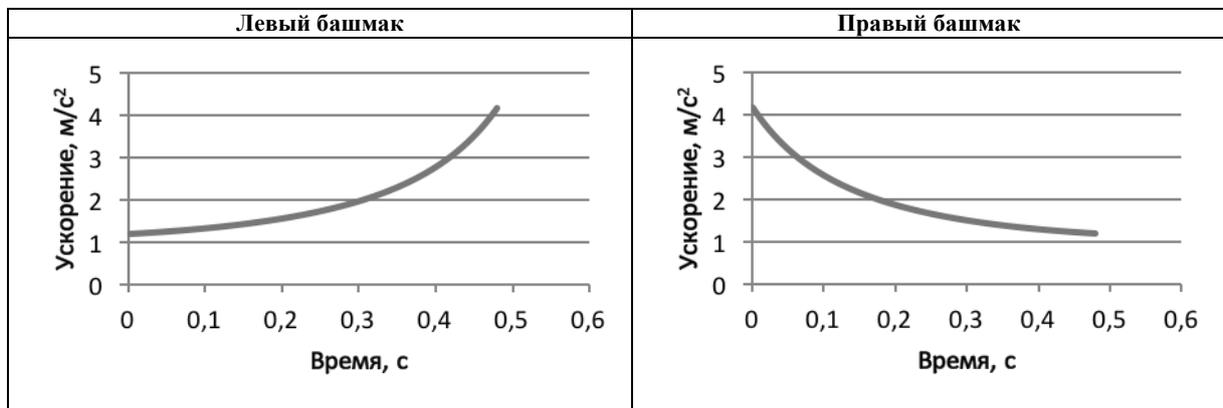
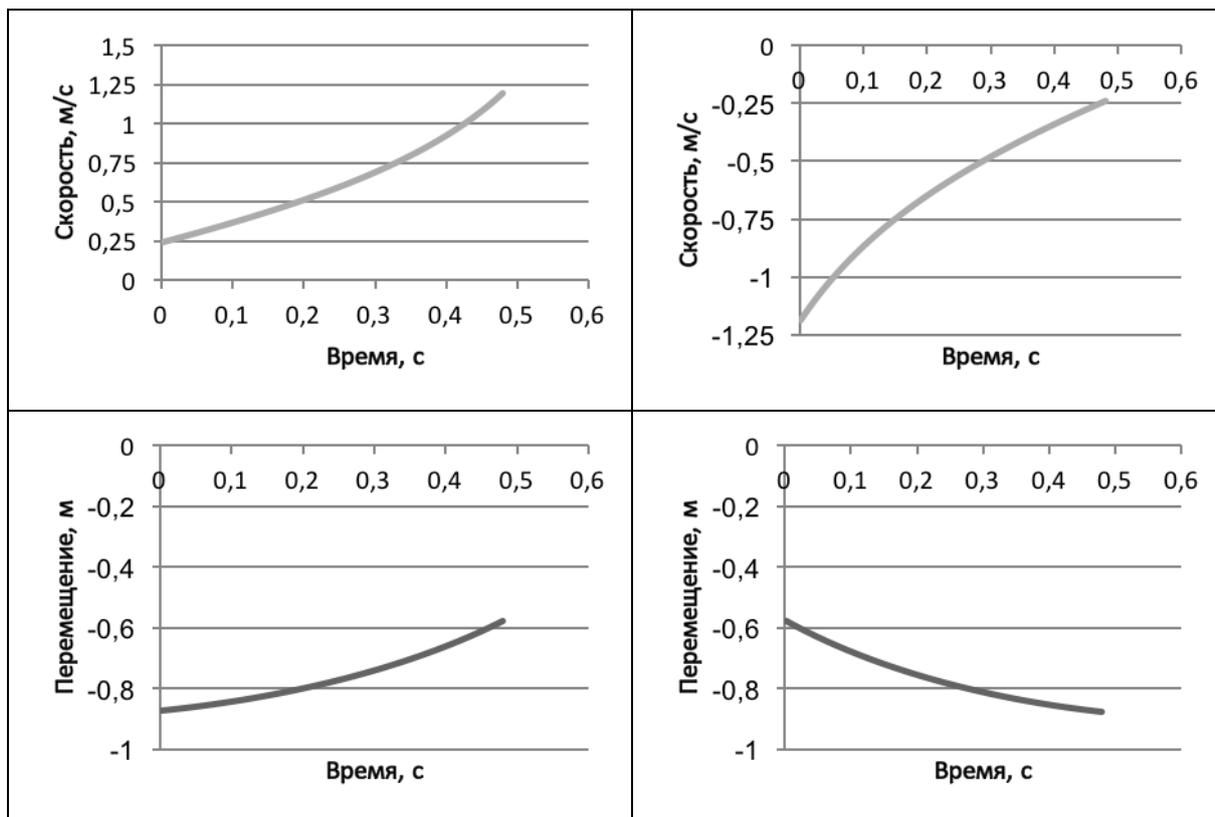


Рис. 11. Verification System

В качестве результата кинематических экспериментов рассматривались скорости, ускорения и абсолютные перемещения башмаков при заданной траектории перемещения при постоянной скорости (1 м/с) перемещения шпиндельного узла. При перемещении шпиндельного узла по отрезку скорость, ускорения и абсолютные перемещения башмаков имеют вид:

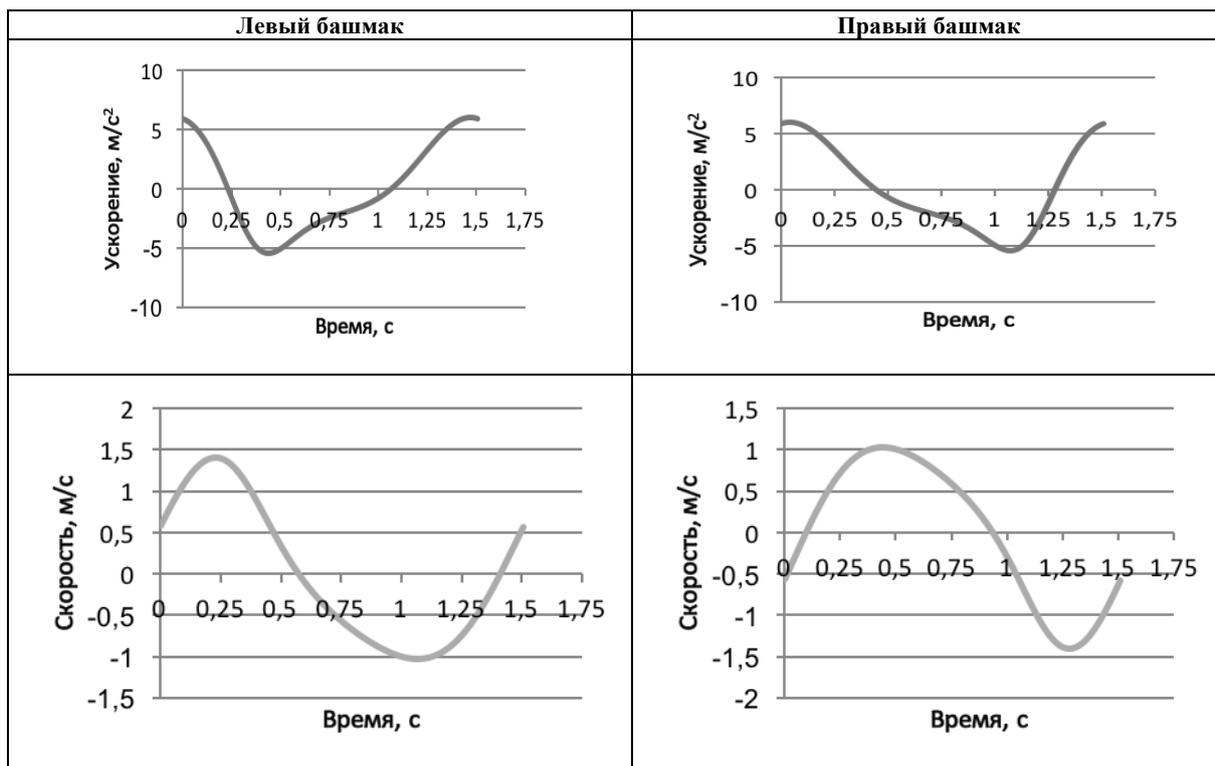
Таблица 1. Скорости, ускорения и абсолютные перемещения башмаков при постоянной скорости

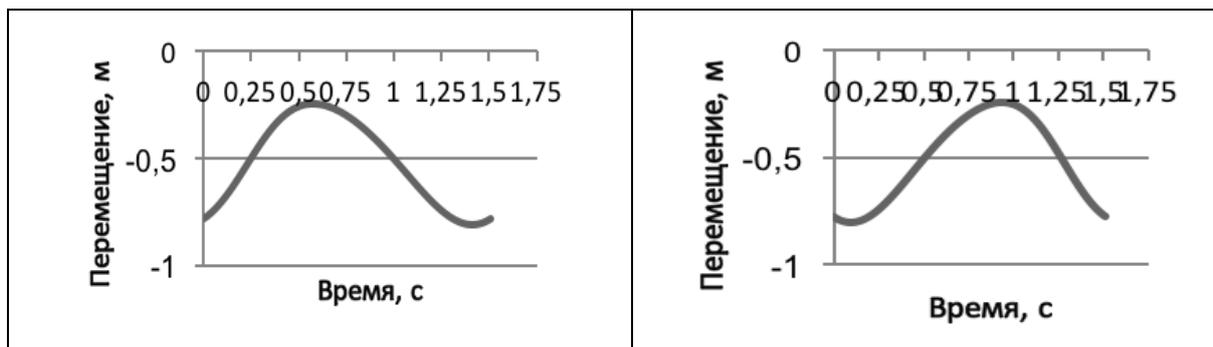




При перемещении шпиндельного узла по окружности скорость, ускорения и абсолютные перемещения башмаков имеют вид:

Таблица 2. Скорости, ускорения и абсолютные перемещения башмаков при перемещении шпиндельного узла





При проведении динамических экспериментов были построены амплитудно-частотные характеристики для различных точек рабочего пространства при различных углах приложения возбуждающего воздействия.

На рисунке показаны амплитудно-частотные характеристики рабочей точки пространства с координатами  $\langle 0,0 \rangle$  и углом приложения возбуждающего воздействия  $0^0$ .

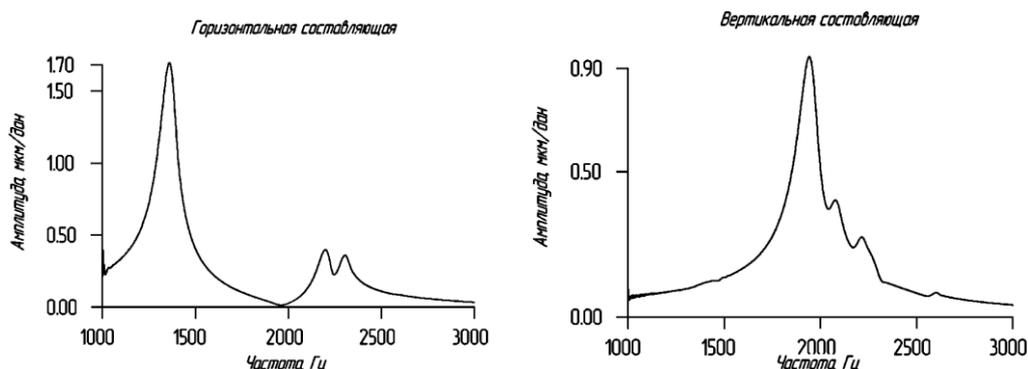


Рис. 12. Амплитудно-частотные характеристики рабочей точки

**Выводы.** Показана возможность кинематического и динамического моделирования упругих систем станков с параллельной кинематикой в среде Simulink. Результаты кинематического исследования показали, что быстроходности шарико-винтовых передач в приводах подач достаточно для обеспечения требуемых скоростей перемещения шпиндельного узла. Из результатов динамических вычислительных экспериментов видно, что амплитудно-частотные характеристики слабо зависят от положения шпиндельного узла в рабочем пространстве, но сильно зависят от угла приложения возбуждающего воздействия.

#### Список литературы / References

1. Бушуев В.В. и др. Металлорежущие станки // Учебник. М.: Машиностроение, 2011.
2. Хомяков В.С., Досько С.И., Терентьев С.А. Повышение эффективности расчета и анализа динамических характеристик станков на стадии проектирования // Станки и инструмент, 1990. № 6. С. 7-12.
3. Klee H. and Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, 2011.
4. Хомяков В.С., Молодцов В.В. Моделирование подвижных стыков при расчете станков // СТИН. 1996. № 6. С. 16-21.
5. Хомяков В.С. Учет демпфирования при динамических расчетах станков // СТИН, 2010. № 6. С. 9-12.
6. Хомяков В.С., Досько С.И. Об учете демпфирования при динамических расчетах станков. СТИН, 1990. № 11. С. 4.
7. Хейлен Вард, Ламменс Стефан, Сас Пол. Модальный анализ: теория и испытания: пер. с англ. / под ред. В.И. Смыслова. М.: ООО «Новотест», 2010.