



3. Perepelkina, A.Yu Diamond Torre Algorithm for High-Performance Wave Modeling/ A.Yu Perepelkina, V.D.Levchenko // Keldysh Institute Preprints. 2015. – Vol. 18. – P. 20.

4. Barney, B Introduction to Parallel Computing/ B. Barney. - Lawrence Livermore National Laboratory, 2010. – 187 p.

5. Orozco, D.A. Mapping the FDTD Application to Many-Core Chip Architectures / D.A. Orozco, G.R. Gao // Parallel Processing. – 2009. – P. 309-316.

6. Maloney, J.G. Adaptation of FDTD techniques to acoustic modeling / J.G. Maloney, K.E. Cummings // 11th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics. – 1995. – Vol. 2. – P. 724-731.

7. Головашкин, Д.Л. Совместное разностное решение уравнений Даламбера и Максвелла. Двумерный случай / Д.Л. Головашкин, Л.В.Яблокова, Е.Ю. Булдыгин // Компьютерная оптика. – 2014. – Т.38, No1. – С. 20-27.

К.С. Кульга, Э.Р. Асбапов

## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОМПОНОВОК СТАНКОВ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ CAD/CAE-СИСТЕМ

(Уфимский государственный авиационный технический университет «УГАТУ»)

**Актуальность проблемы.** Компоновка мехатронного станка (далее, станок), как правило, состоит из одного стационарного (постоянно неподвижного) и нескольких подвижных элементов, разделённых соединениями (стыками) [1]. Создание (синтез) компоновки осуществляется на ранней стадии проектирования станка после определения его характеристик, выбора метода и движений формообразования, предварительного определения кинематической структуры. Компоновка станка влияет на его основные показатели качества: статические и динамические упругие деформации, термические деформации, на распределение давлений и износ в подвижных соединениях.

**Цель научного исследования.** Разработка методики динамического анализа компоновок станков с ЧПУ на стадии эскизного проектирования на основе применения программного обеспечения (ПО) CAD (*Computer Aided Design*)/CAE(*Computer Aided Engineering*)-систем и метода конечных элементов (МКЭ).

**Теоретическая часть.** Совместное использование ПО CAD/CAE-системы позволяет в максимальной степени задействовать достоинства графической среды (параметризация, поверхностное и твердотельное геометрическое моделирование, кинематика сборок) и получить результаты статического, модального и динамического анализов компоновок станков на стадии эскизного проектирования [2].

Рассмотрим этапы реализации предлагаемой методики создания конечно-элементной модели компоновки станка для механической обработки детали,



имеющего порталную компоновку «*Gantry*» (далее, станка). В качестве компоновки станка-аналога выбрано оборудование производства компании ООО «СТАН» [3]. Пятикоординатные вертикальные фрезерные обрабатывающие центры порталной конструкции обеспечивают операции фрезерования, сверления, растачивания и токарной обработки. Это станок должен иметь высокие показатели статического и динамического качества. Исходными данными для реализации методики являются результаты системного анализа конструкции и базового технологического процесса изготовления детали-представителя, определения перечня формообразующих исполнительных движений и структурно-кинематические схемы компоновок станков.

1 этап. Проектирование 3D-геометрической модели компоновки станка в CAD-системе [3] и адаптация этой модели для динамического анализа в CAE-системе [4];

2 этап. Создание сетки конечных элементов (КЭ) в CAE-системе – один из важнейших этапов статического анализа компоновки станка на основе МКЭ. Рекомендуется строить график сходимости результатов статических, модальных и динамических анализов, позволяющий сделать рекомендации для различных методов дискретизации конечно-элементной модели станка [4].

3 этап. Моделирование граничных условий для конечно-элементной модели компоновки станка. В ходе реализации этого этапа учитывается как действие активных силовых факторов (составляющих сил резания), так и наложенных на систему связей (подвижные и неподвижные стыки) [4];

4 этап. Статический анализ конечно-элементной модели компоновки станка и обработка результатов. Настройка параметров решающей программы для управления итерациями метода решения, улучшения точности или скорости получения результатов;

5 этап. Модальный анализ конечно-элементной модели компоновки станка для определения форм колебаний на общестаночных собственных частотах;

6 этап. Динамический анализ конечно-элементной модели компоновки станка. Исходными наборами данных для проведения динамического анализа являются ранее полученные результаты статического и модального анализов модели станка. Модальное демпфирование станка принято равным 2%. Топология конечно-элементной модели компоновки станка приведена на рисунке 1.

В таблице 1 приведены результаты динамического анализа конечно-элементной модели компоновки станка на частоте 6.4437 Гц.

Амплитудно-частотная характеристика модели компоновки станка приведена на рисунке 2.

Динамический анализ конечно-элементной модели компоновки станка выявил:

– расчетное значение максимального напряжения по критерию *Von Mises* не превышает допустимого значения предела текучести материала с худшими механическими свойствами:  $4,638 \times 10^5 \text{ Н/мм}^2 < [2,5 \times 10^8] \text{ Н/мм}^2$ ;

– расчетное максимальное суммарное динамическое перемещение *URES* не превышает допустимое значение (допустимое значение перемещения опре-



делено с учетом заданных требований по точности обработки размеров детали):  
 $0,4571 \text{ мм} < [0,5] \text{ мм}$ .

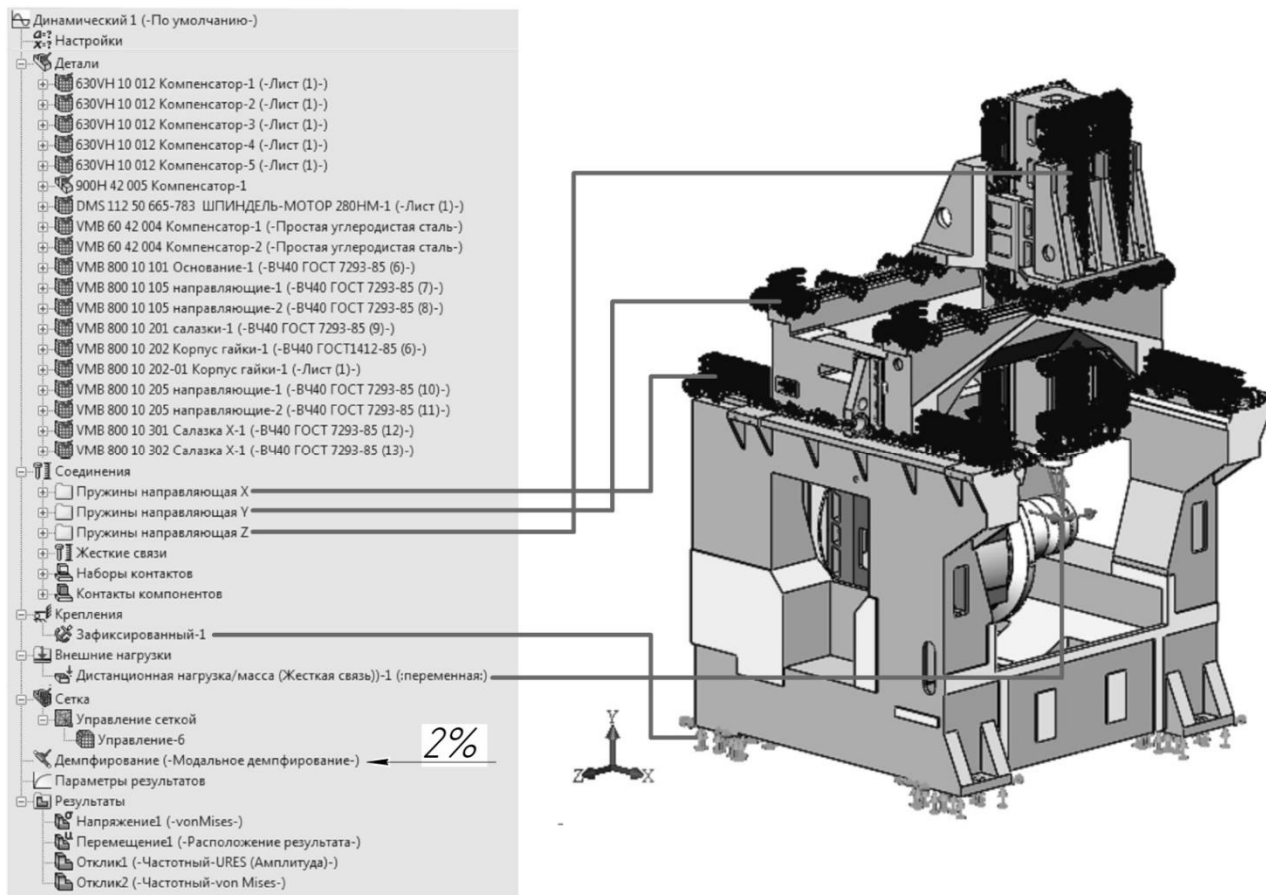


Рисунок 1 – Структура модели станка для динамического анализа

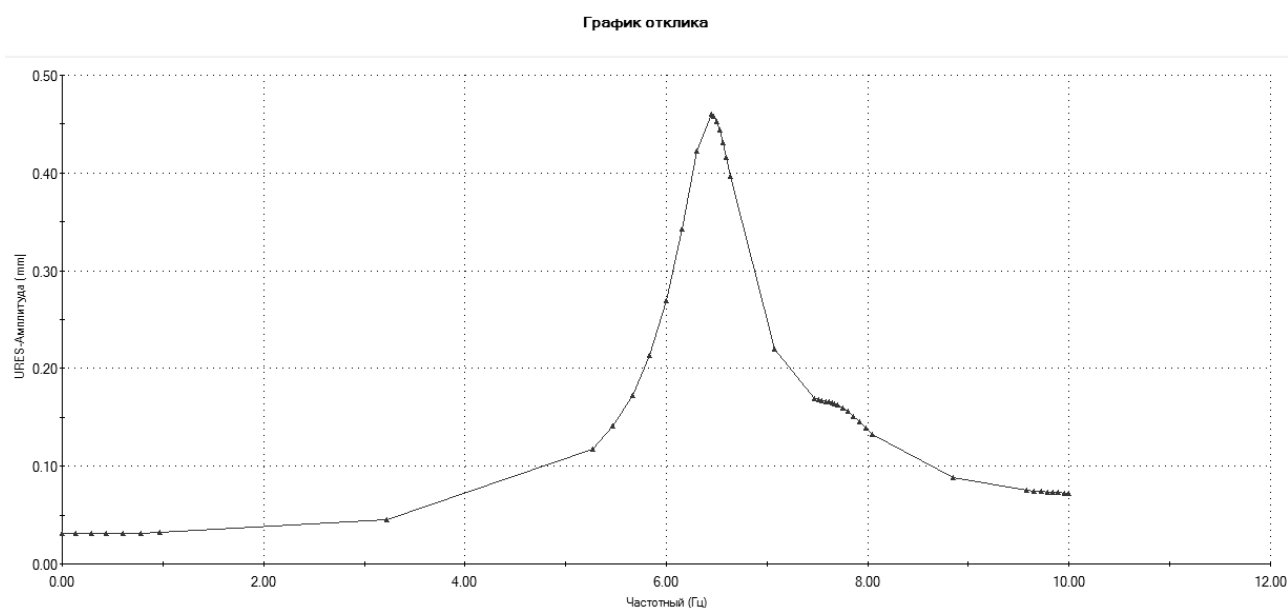
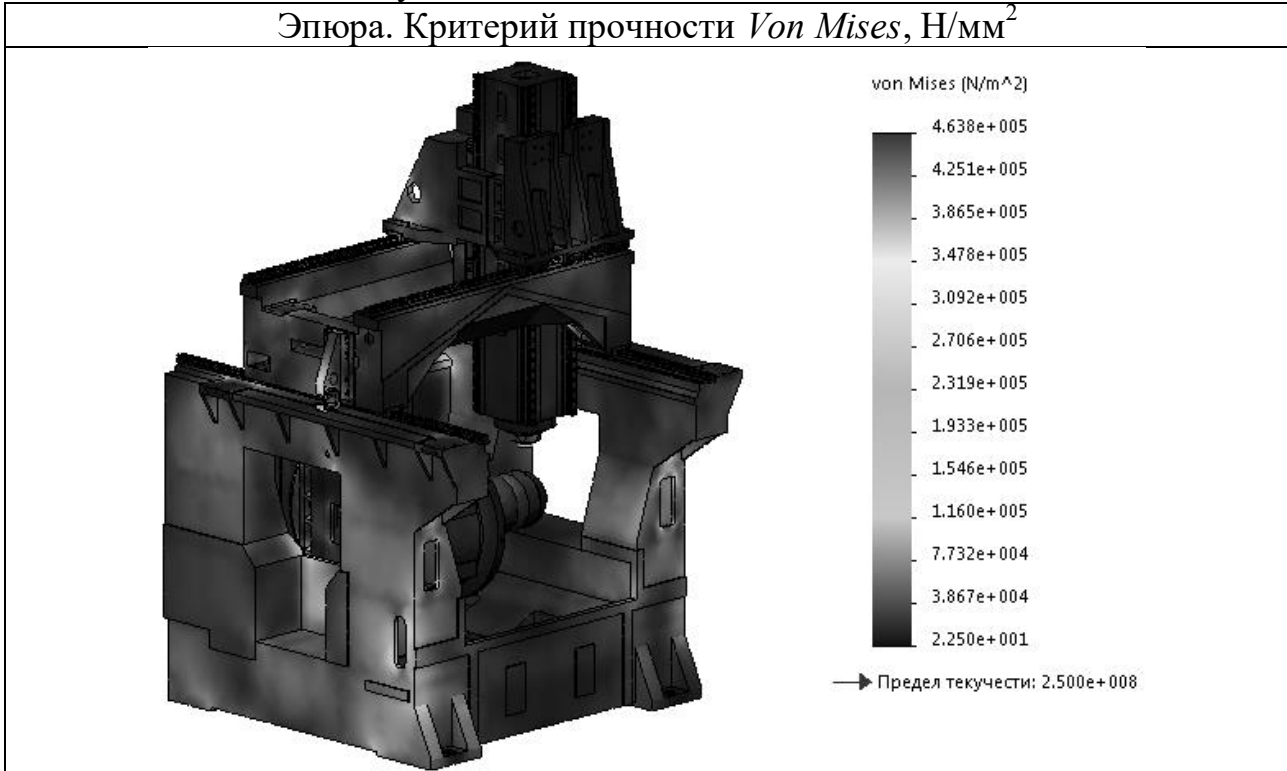


Рисунок 2 – Зависимость между динамическим перемещением *URES* и частотой

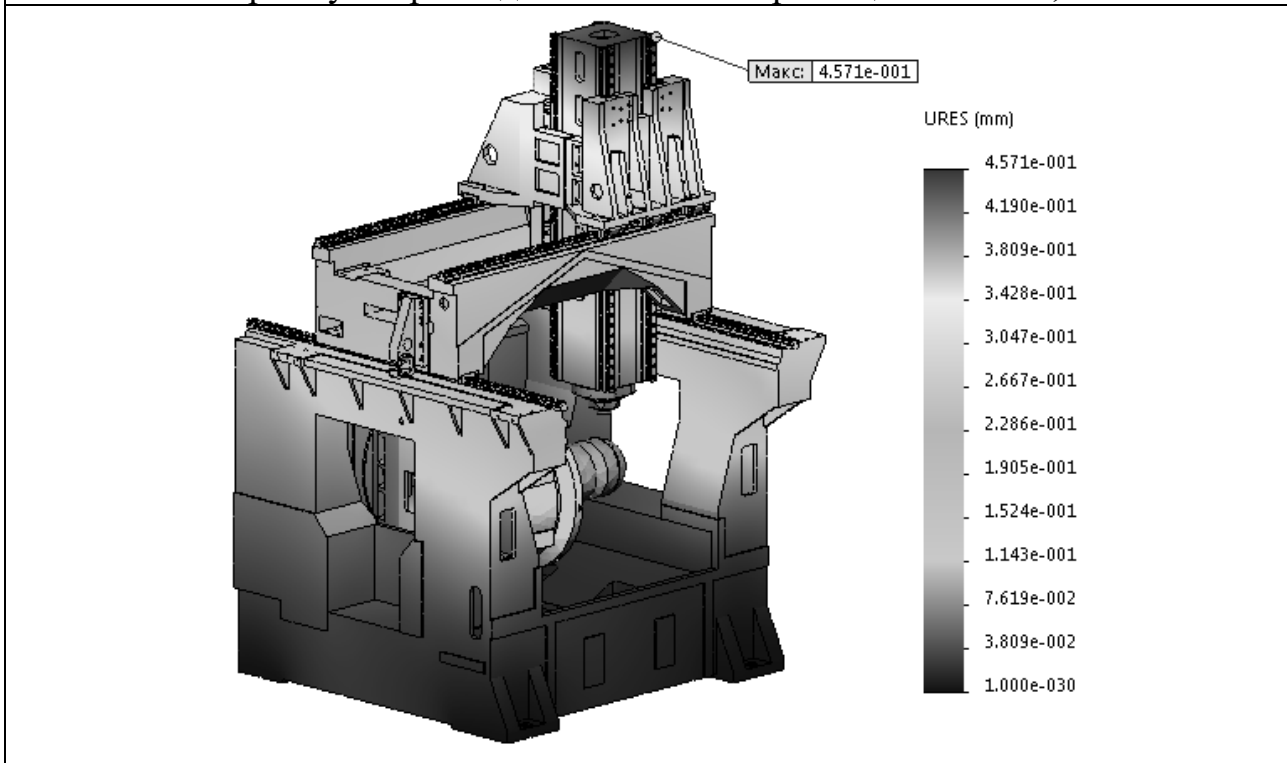


Таблица 1 – Результаты динамического анализа модели станка  
Эпюра. Критерий прочности *Von Mises*, Н/мм<sup>2</sup>



Расчетное значение: предел текучести  $4,638 \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> (0,4638 МПа)  
Допустимое значение: предел текучести  $2,50 \times 10^8$  Н/мм<sup>2</sup> (250 МПа)

Эпюра. Суммарные динамические перемещения *URES*, мм



Расчетное значение: 0,4571 мм.  
Допустимое значение: не более 0,5 мм.



**Заключение.** Предложенная методика позволяет проводить динамический анализ компоновок станков на ранних стадиях проектирования (эскизное проектирование, техническое предложение) с применением ПО *CAD/CAE*-систем и МКЭ.

### Литература

1. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков / Врагов Ю. Д. – М.: Машиностроение. – 1978. – 208 с.;
2. Dassault Systemes [Электронный ресурс]: // SolidWorks. – 2019. Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru>. – Проверено 16.05.2019.
3. ООО «Стан» [Электронный ресурс] // СТАН – лидер российского станкостроения. – 2019. – Режим доступа: <https://www.stan-company.ru>. – Проверено 16.05.2019.
4. Информационные технологии в проектировании мехатронного оборудования: учеб. пособие / К. С. Кульга; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 201 с.

К.С. Кульга, А.А. Китаев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЛОЖЕННЫХ СЕТЯХ ПЕТРИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

(Уфимский государственный авиационный технический  
университет «УГАТУ»)

Цифровая экономика и существенное повышение конкуренции на мировом рынке ставят перед предприятиями авиационной, авиадвигателестроительной и машиностроительной промышленности (далее, предприятия) новые задачи, связанные с повышением эффективности производства партий деталей и сборочных единиц (ДСЕ) высокотехнологической продукции. Для решения этих задач, ведущие зарубежные компании продолжают активно вести исследования в следующих перспективных направлениях: создание новых методологий компьютерного моделирования, проектирования и изготовления гибких производственных систем (ГПС) с применением оборудования с ЧПУ, функционирующих в едином информационном пространстве предприятия в безлюдном режиме. Экономическая эффективность внедрения ГПС на предприятиях определяется совокупностью конструкторских, технологических, производственных, организационных, экономических и управленческих решений. Следовательно, результативность внедрения ГПС, может быть достигнута с учётом значений группы выходных параметров (критериев) ГПС, определение которых, является трудоемкой задачей.

Для решения этой задачи предложены новый метод имитационного моделирования компоновок ГПС и других производственных систем с помощью модифицированных вложенных сетей Петри (МВСП) [**Ошибка! Источник**