

# Применение CAD/CAE-систем для статического исследования компоновок мехатронного станочного оборудования

К.С. Кульга, д.т.н. (УГАТУ, Уфа)

info@stalkerplm.com

## Актуальность проблемы

Компоновкой мехатронного станочного оборудования (МСО) называется совокупность исполнительных звеньев и деталей несущей системы, которая характеризуется их количеством, типом, пространственным расположением и пропорциями. Это определение и основы изучения компоновки МСО, как самостоятельного объекта, содержатся в монографии Ю.Д. Врагова [1]. Как правило, компоновка МСО формируется из одного стационарного (постоянно неподвижного) и нескольких подвижных элементов, разделенных соединениями (стыками). Создание (синтез) компоновки осуществляется на ранней стадии проектирования МСО после определения его характеристик, выбора метода и движений формообразования, предварительного определения кинематической структуры. Эта стадия проектирования МСО является самой ответственной, так как от правильности выбора компоновки во многом зависит успех проекта в целом.

## Цель научного исследования

Целью научного исследования является разработка методики статического исследования компоновок МСО на ранней стадии проектирования на основе применения CAD/CAE-систем и метода конечных элементов (МКЭ).

## Методика создания конечно-элементной модели компоновки МСО

Конечно-элементный анализ (*Finite Elements Analysis*) широко применяется при решении задач механики деформируемого тела, теплообмена, гидро- и газодинамики, электро- и магнитостатики и других областей физики [2, 3]. Программные системы, реализующие МКЭ, позволяют с достаточной точностью и оперативностью оценить несущую способность (то есть способность конструкции выдерживать максимальную нагрузку, обеспечивая функционирование изделия с заданными техническими характеристиками) компоновки МСО.

В качестве CAE-системы применялась COSMOSWorks. В настоящее время она входит в семейство интегрированных расчетных модулей **SolidWorks Simulation**, объединяющее: собственно *Simulation* (ранее – *COSMOSWorks*), *Flow Simulation* (ранее – *COSMOSFloWorks*) и *SolidWorks Motion* (ранее – *COSMOSMotion*) и др. [3].

Ориентация на совместное использование этой CAE-системы с CAD-системой *SolidWorks* позволила разработчикам ПО в максимальной степени задействовать достоинства графической среды:

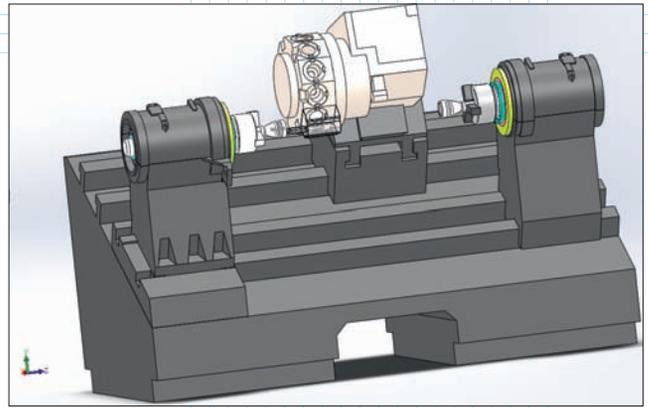


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель компоновки токарного МСО

мощную параметризацию, поверхностное и твердотельное геометрическое моделирование, кинематику сборок. Важным преимуществом применения CAE-системы является возможность получения результатов статических исследований несущей конструкции компоновки МСО на стадии эскизного проектирования (технического предложения).

Рассмотрим методику создания конечно-элементной модели компоновки токарного МСО. Допуск на обрабатываемый размер детали-представителя – не более 2.4E-05 м.

**Этап 1.** Создание геометрической модели компоновки токарного МСО в CAD-системе *SolidWorks* [3]; результат приведен на рис. 1.

**Этап 2.** Определение схемы действия составляющих силы резания.

Расчет режимов резания и сил резания осуществляется с помощью следующих работ [4, 5, 6]. При значениях предела прочности материала заготовки  $\sigma_B = 1100$  МПа, глубине резания  $t = 3$  мм, подаче  $s = 0.24$  мм/об, величина скорости резания  $V = 241.2$  м/мин (расточивание) [6]. Точение осуществляется резцом с пластиночкой твердого сплава ВК60М ГОСТ3882–74.



Рис. 2. Силовая расчетная схема

Результаты расчета сил резания:

$$P_z(R_z) = 1520.4 \text{ Н}; \\ P_y(R_y) = 600.2 \text{ Н}; P_x(R_x) = 622.8 \text{ Н}; M_p = 42 \text{ Н·м}.$$

**Этап 3.** Расчет потребной силы зажима заготовки (детали) в трехкулачковом патроне.

На рис. 2 приведена силовая расчетная схема

для определения силы зажима заготовки (детали)  $W'$ .

$$k \cdot M_p = M_{mp1} = 3 \cdot W' \cdot f_1 \cdot r; \quad (1)$$

$$W' = \frac{k \cdot M_p}{3 \cdot f_1 \cdot r}, \quad (2)$$

где  $W'$  – необходимая сила зажима [7];  $M_p$  – момент сил обработки резанием;  $f_1$  – коэффициент трения ( $f_1 = 0.85$ );  $r$  – радиус детали в месте закрепления ( $r = 18$  мм);  $k$  – коэффициент запаса;

где  $k_0$  – гарантированный коэффициент запаса

$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6$ , (3)

( $k_0 = 1.5$ );  
 $k_1$  – коэффициент запаса, учитывающий возрастание сил обработки при затуплении инструмента ( $k_1 = 1$ );

$k_2$  – коэффициент запаса, учитывающий неравномерность сил резания из-за непостоянства снимаемого при обработке припуска ( $k_2 = 1$ );

$k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий изменение сил обработки при прерывистом резании ( $k_3 = 1$ );

$k_4$  – коэффициент запаса, учитывающий непостоянство развиваемых приводами сил зажима для механизированных зажимных устройств ( $k_4 = 1$ );

$k_5$  – коэффициент запаса, учитывающий непостоянство развиваемых сил зажимных устройств с ручным приводом для механизированных зажимных устройств ( $k_5 = 1$ );

$k_6$  – коэффициент запаса, учитывающий неопределенность положения мест контакта заготовки с установочными элементами и изменение в связи с этим моментов трения, противодействующих повороту заготовки; при обработке в трехкулачковом патроне не учитывается ( $k_6 = 1$ ).

$$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 = 1.5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1.5,$$

Результат расчета по формуле (2):

$$W' = \frac{k \cdot M_p}{3 \cdot f_1 \cdot r} = \frac{1.5 \cdot 42000}{3 \cdot 0.85 \cdot 18} = 1372.55 \text{ Н}$$

**Этап 4.** Расчет жесткости подвижных стыков компоновки МСО.

Методика расчета жесткости подвижных стыков (направляющих) компоновок МСО подробно описана в монографии [1].

**Этап 5.** Расчет жесткости подшипников шпиндельного узла МСО.

Для определения радиальной и осевой жесткости подшипников, применяемых в шпиндельных узлах МСО, можно использовать промышленные каталоги (например, компания NSK, Япония [8]) или возможности ПО САПР “Шпиндельный узел” (кафедра “Станки” МГТУ “СТАНКИН” [9]).

**Этап 6.** Расчет жесткости опор компоновки МСО.

Величина жесткости опор компоновки рассчитывается по формуле (4).

$$p = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где  $F$  – сила, нагружающая каждую опору;  $\delta$  – деформация опоры под действием силы  $F$ .

Деформацию опор  $\delta$ , нагруженной силой  $F$ , определим на основе метода конечных элементов.

Давление на опору вычислим по формуле (5).

$$J = \frac{F}{\delta}, \quad (5)$$

где  $S = 2123.72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  – площадь верхней грани опоры (определена в САД-системе SolidWorks).

Расчетная схема опоры компоновки токарного МСО в используемой САЕ-системе представлена на рис. 3.

В табл. 1 приведены результаты статического исследования конечно-элементной модели опоры компоновки МСО.

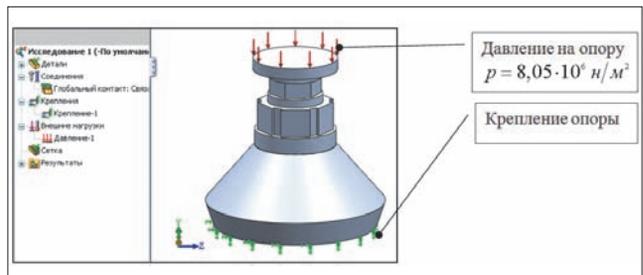


Рис. 3. Расчетная схема опоры

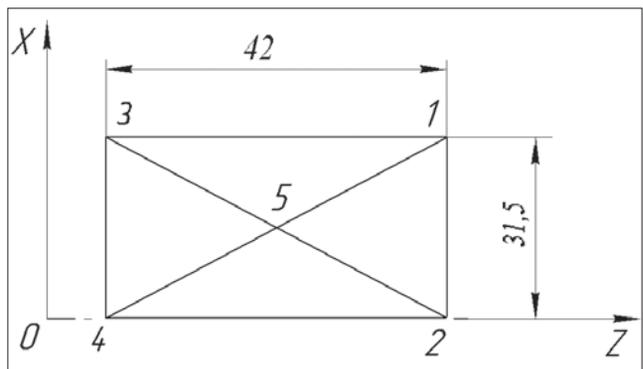


Рис. 4. Рабочее поле компоновки токарного МСО

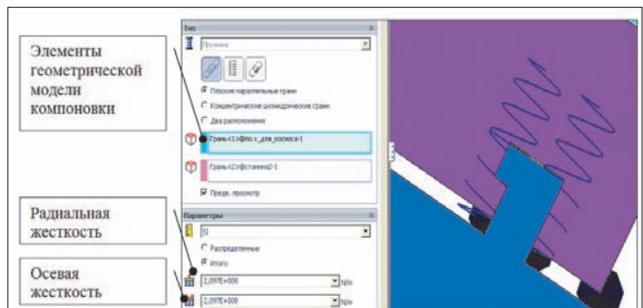
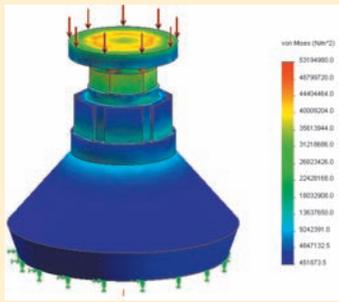
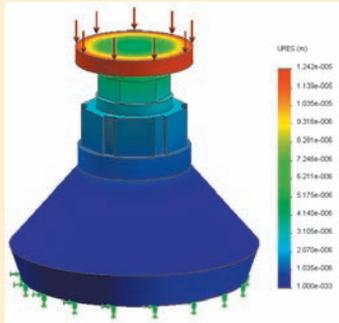


Рис. 5. Определение наборов данных КЭ “Пружина” (подвижный стык)

Табл. 1. Сводные результаты статического исследования опоры

Наименование характеристики	Максимальное значение характеристики, номер узла с координатами	Результаты статического исследования
Эквивалентное напряжение. Критерий Мизеса ( <i>Von Mises</i> )	5.3195E+007 Н/м <sup>2</sup> Координаты узла 1520: X: 13.1832 мм Y: 72.6296 мм Z: -9.50301 мм	
URES: Результирующее перемещение	$\delta = 1.2421E-005$ м Координаты узла 719: X: 25.4406 мм Y: 86.9296 мм Z: 6.72993 мм	

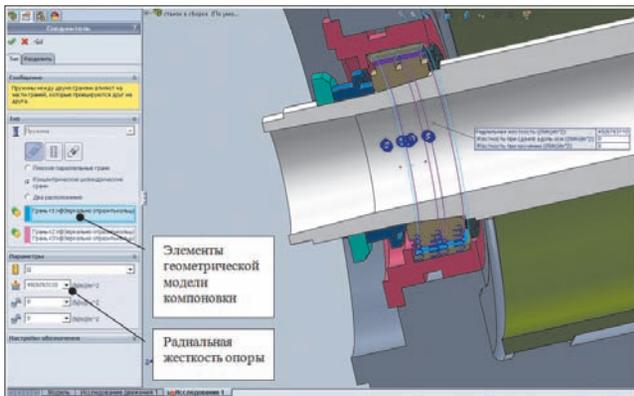


Рис. 6. Определение набора данных КЭ “Пружина” (подшипник)

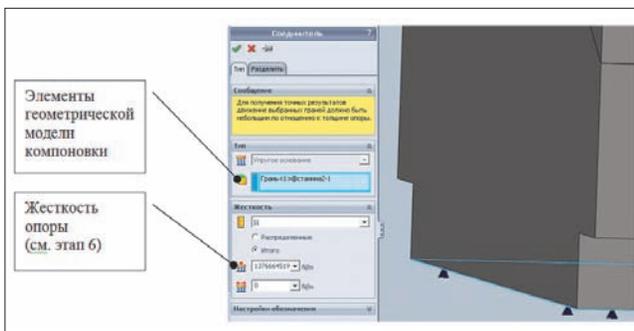


Рис. 7. Определение набора данных КЭ “Упругое основание” (опора)

**Вывод** по результатам статических исследований опоры компоновки токарного МСО: допустимое значение критерия прочности *Von Mises* ( $6.25E+008$  Н/м<sup>2</sup>) больше его максимального расчетного значения ( $5.3195E+007$  Н/м<sup>2</sup>, см. табл.1), а значит, условие прочности модели выполняется. Жесткость опоры компоновки МСО определим по формуле (4).

$$J = \frac{F}{\delta} = \frac{17099.55}{1.2421 \cdot 10^{-5}} = 1376664519.76 \text{ Н/м}^2$$

**Этап 7.** Исследование напряженно-деформированного состояния компоновки МСО.

Рабочее поле (часть рабочего пространства, в которой режущий инструмент и деталь могут взаимодействовать [1]) компоновки токарного МСО имеет форму прямоугольника и включает пять точек (рис. 4).

Осевые и радиальные жесткости подвижного стыка компоновки моделируется конечным элементом (КЭ) “Пружина” [3] между плоскими параллельными гранями (рис. 5).

Радиальная и осевая жесткость подшипников качения передней и задней опор шпиндельного узла компоновки токарного МСО, распределенная на площадь грани, моделируется КЭ “Пружина” [3]. На рис. 6 показан пример определения наборов данных такого КЭ.

Жесткость опоры компоновки (неподвижный стык) моделируется КЭ “Упругое основание” [3]. На рис. 7 показан пример определения наборов данных такого КЭ.

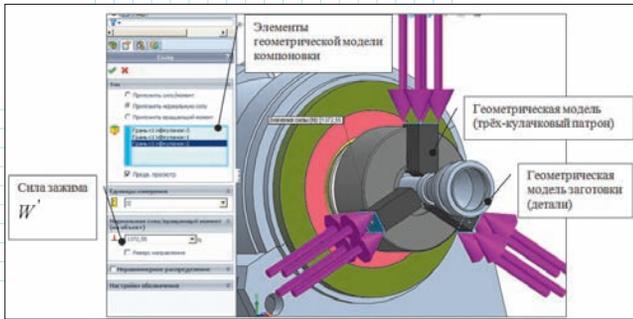


Рис. 8. Определение набора данных КЭ “Сила” (сила зажима)

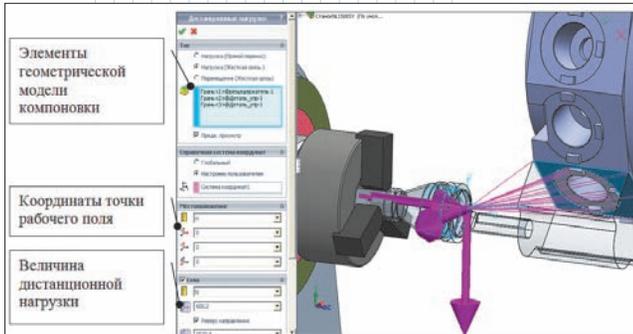


Рис. 9. Определение наборов данных ограничения “Дистанционная нагрузка”

Сила зажима заготовки (детали) в трехкулачковом патроне моделируется нормальными силами, приложенными к верхним торцевым поверхностям кулачков (рис. 8).

На рис. 9 приведен пример использования ограничения “Дистанционная нагрузка” [3] (граничное условие на удалении), одновременно прикладываемого к заготовке (точка рабочего поля компоновки токарного МСО, см. рис. 4) и грани револьверной головки.

На рис. 10 приведен пример использования ограничения “Сила (Вращающий момент)” [3] в приводе главного движения шпиндельного узла токарного МСО.

Общая расчетная схема модели компоновки токарного МСО показана на рис. 11.

В табл. 2 приведены два варианта настроек параметров сетки и статического исследования конечно-элементной модели компоновки токарного МСО.

Для повышения точности статического исследования были применены опции САЕ-системы для повышения качества сетки, которые позволили улучшить параметры дискретизации модели компоновки МСО [3].

На рис. 12 приведены результаты дискретизации модели компоновки токарного МСО для

Табл. 2. Наборы данных настроек дискретизации и исследования модели

Номер варианта	Параметры настроек сетки и статического исследования модели [3]	Параметры детализации сетки модели в САЕ-системе [3]
1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Сетка: стандартная Качество сетки: черновое</li> <li>2 Опция “Управление сеткой”: не применялась</li> <li>3 Количество узлов: 36449</li> <li>4 Количество элементов: 142037</li> <li>5 Решающая программа: <i>Direct Sparse</i></li> <li>6 Время дискретизации: 24 с</li> <li>7 Время исследования: 79 с</li> <li>8 Объем оперативной памяти: 310 Мб</li> </ol>	
2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Сетка: на основе кривизны Качество сетки: высокое Точки Якобиана: в узлах</li> <li>2 Опция “Управление сеткой”: применена</li> <li>3 Количество узлов: 406391</li> <li>4 Количество элементов: 235100</li> <li>5 Решающая программа: <i>FFEPlus</i></li> <li>6 Время дискретизации: 33 с</li> <li>7 Время исследования: 109 с</li> <li>8 Объем оперативной памяти: 575 Мб</li> </ol>	

Примечания:

1. На вышеприведенной форме “Сетка. Детализация” приведены наборы данных для 2-го варианта дискретизации модели;
2. Адаптивные методы исследования не применялись из-за использования граничных условий на удалении (силы резания)

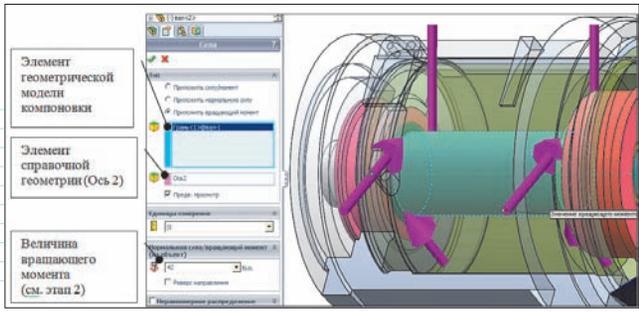


Рис. 10. Определение набора данных ограничения "Вращающий момент"

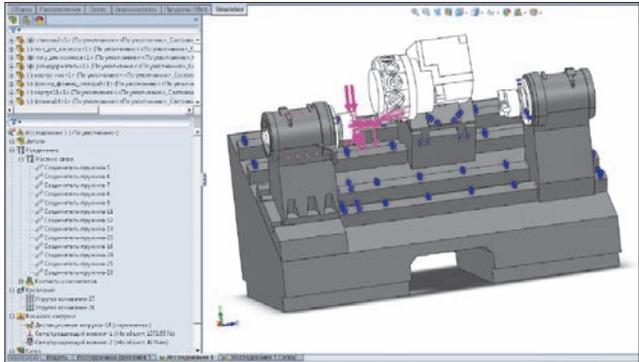


Рис. 11. Расчетная схема модели компоновки токарного МСО

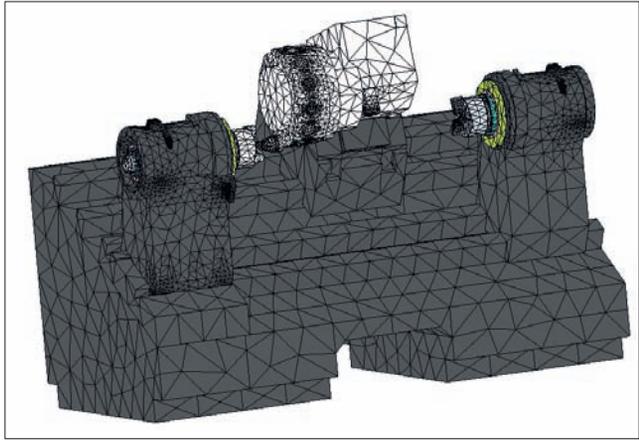


Рис. 12. Результат дискретизации модели компоновки токарного МСО

второго варианта настройки параметров сетки (см. табл. 2).

На рис. 13, 14 показаны результаты расчетов суммарных статических перемещений  $URES$  и критерия прочности  $von Mises$  для двух вариантов настроек дискретизации/исследования модели и пяти точек рабочего поля компоновки токарного МСО.

**Выводы**

На основании анализа результатов статических исследований компоновки токарного МСО можно сформулировать следующие выводы:

- расчетные значения критерия  $von Mises$  не превышают соответствующих допустимых значений;
- расчетные значения максимальных статических перемещений  $URES$  превышают значения допуска для обработки размера детали ( $2.4E-05$  м);
- наибольшие значения критерия  $von Mises$  и суммарных статических перемещений  $URES$  выявлены в третьей точке рабочего поля (рис. 15);
- баланс суммарных статических перемещений  $URES$  элементов компоновки токарного МСО, рассчитанный для третьей точки рабочего поля, приведен на рис. 16;
- лучшие результаты сходимости результатов расчетов (погрешность до 10%), при незначительном

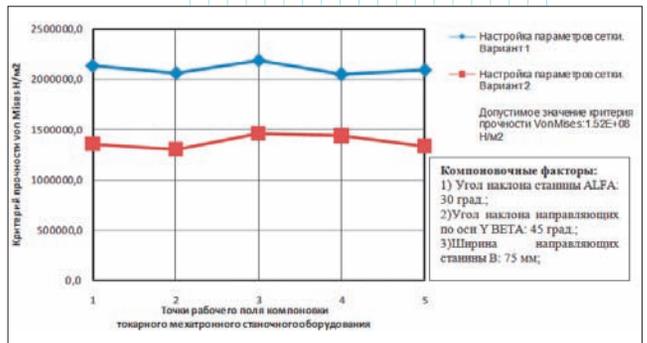


Рис. 13. Графики критерия прочности  $von Mises$

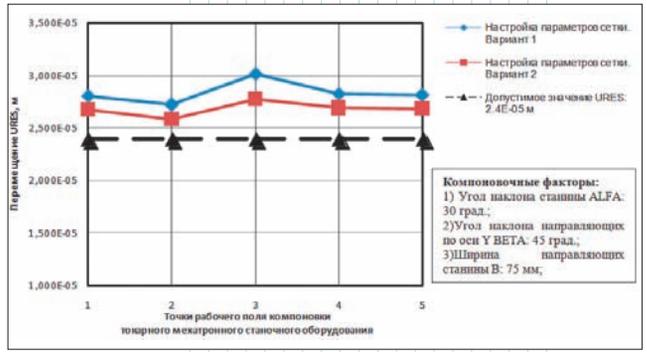


Рис. 14. Графики статических перемещений  $URES$

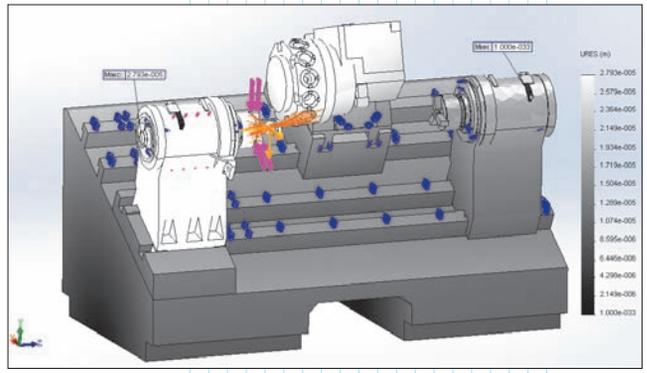


Рис. 15. Эюра  $URES$  (3-я точка рабочего поля компоновки МСО)

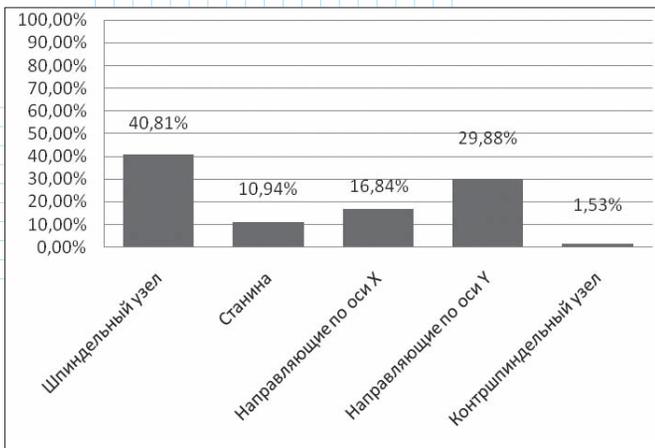


Рис. 16. Баланс статических перемещений URES элементов компоновки MCO

увеличению времени вычислений и требований к аппаратным ресурсам ЭВМ, получены для второго варианта настроек параметров дискретизации и исследования модели (см. табл. 2).

Определим влияние компоновочных факторов [1] для улучшения результатов статического исследования модели компоновки (третья точка рабочего поля компоновки, второй вариант настройки параметров дискретизации и исследования модели):

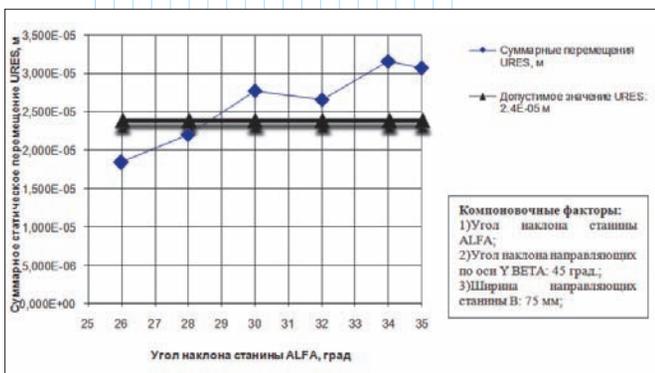


Рис. 17. График суммарных статических перемещений URES

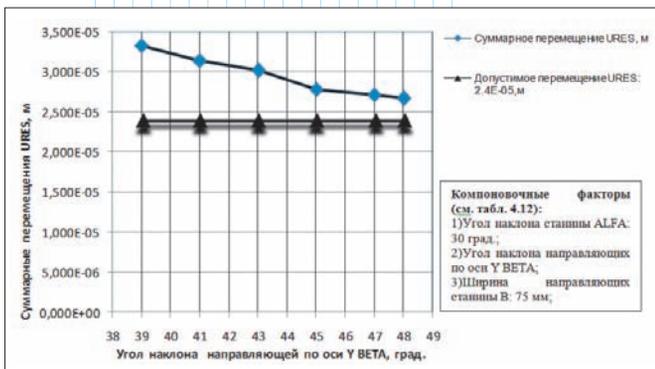


Рис. 18. График суммарных статических перемещений URES

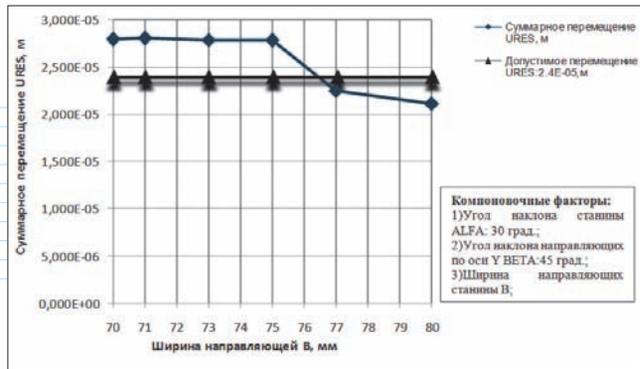


Рис. 19. График суммарных статических перемещений URES

1 Угол наклона станины – ALFA (град.).

Результаты статических исследований приведены на рис. 17. Для дальнейших исследований будем использовать геометрическую модель станины компоновки MCO с углом ALFA, равным 28 град.

2 Угол наклона направляющей по оси Y – BETA (град.).

Результаты статических исследований приведены на рис. 18. Для дальнейших исследований будем использовать геометрическую модель направляющих с углом BETA, равным 46 град.

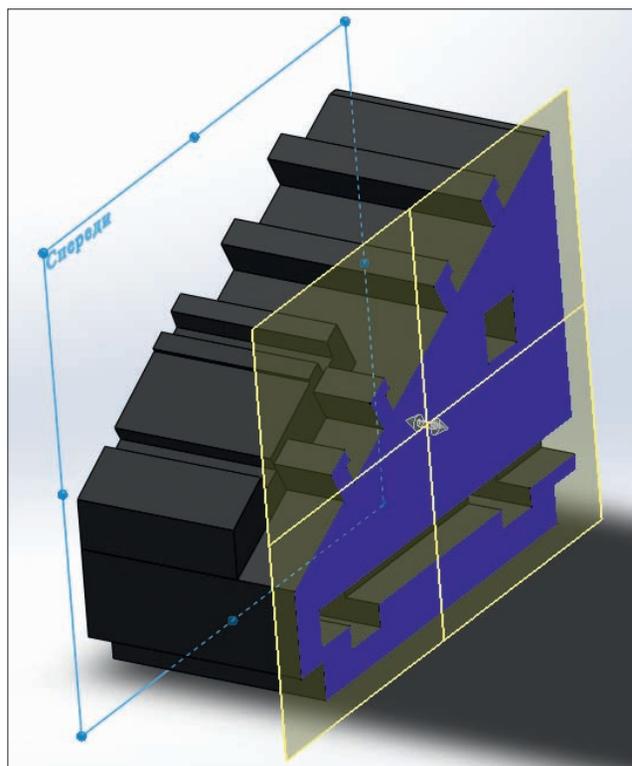


Рис. 20. Измененная геометрическая модель станины

**Табл. 3. Сводные результаты статического исследования компоновки токарного МСО**

Наименование характеристики	Значение
Критерий прочности <i>von Mises</i> , Н/м <sup>2</sup>	1342498.3
Максимальное статическое перемещение <i>URES</i> , м	2.067E-05
Эквивалентная деформация <i>ESTRN</i>	8.140E-05
Масса, кг	13526858.35

**3** Ширина направляющих по оси *Z – B* (мм).

Результаты статических исследований приведены на **рис. 19**. Для дальнейших исследований будем использовать геометрическую модель направляющих с шириной *B*, равной 77 мм.

**4** Подшипники передней и задней опор шпиндельного узла.

В результате изменения серии подшипников в опорах шпиндельного узла (средняя серия была заменена на тяжелую) величина максимального статического перемещения *URES* уменьшилась с 2,778E-05 м до 2,650E-05 м.

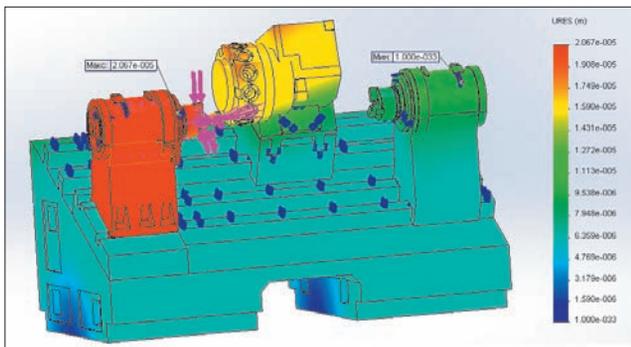
**5** Масса станины.

Внесение конструктивных изменений в геометрическую модель станины компоновки токарного МСО позволило уменьшить её массу с 15548.53 кг до 12402.23 кг (**рис. 20**).

Результаты статического исследования конечно-элементной модели токарного МСО, на основе выбранных компоновочных факторов, приведены в **табл. 3** и на **рис. 21**.

**Заключение**

Полученные результаты статических исследований конечно-элементной модели компоновки токарного МСО с измененными компоновочными факторами удовлетворяют допустимым значениям по критерию прочности *von Mises* (6.25E+008 Н/м<sup>2</sup>) и суммарным статическим перемещениям *URES* в третьей точке рабочего поля компоновки токарного МСО (2.4 E-05 м).



**Рис. 21. Эпюра статических перемещений *URES* в 3-й точке рабочего поля компоновки токарного МСО**

Предложенная методика позволяет проводить статические исследования различных видов компоновок на самой ответственной стадии проектирования МСО (эскизное проектирование/техническое предложение) с помощью CAD/CAE-систем и метода конечных элементов.

**Об авторе**

Кульга Константин Станиславович – доктор технических наук, профессор кафедры “Мехатронные станочные системы” Уфимского государственного авиационного технического университета.

**Список литературы**

1. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металло-режущих станков: (Основы компонентки). Москва: Машиностроение, 1978, 208 с.
2. Алямовский А.А. CosmosWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks. Москва: ДМК Пресс, 2010, 784 с.
3. Dassault Systemes // [www.3ds.com](http://www.3ds.com)
4. Кульга К.С. Информационные технологии проектирования и эксплуатации мехатронного оборудования. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 220400 “Мехатроника и робототехника”, специальности 220401 “Мехатроника”. Уфа: УГАТУ, 2008, 193 с.
5. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. Справочник /Под ред. В.И. Баранчикова. Москва: Машиностроение, 1990, 399 с.
6. Гузеев В.И., Батуев В.В., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением. Справочник /Под. ред. В.И. Гузеева. Москва: Машиностроение, 2005, 368 с.
7. Горохов В.А. Проектирование и расчет приспособлений: Учебное пособие для студентов вузов машиностроительных специальностей. Минск: Вышэйшая школа, 1986, 238 с.
8. NSK Global // [www.nsk.com](http://www.nsk.com)
9. Московский государственный технологический университет “СТАНКИН” // [www.stankin.ru](http://www.stankin.ru)