

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-6.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN617.pdf>

Статья опубликована 06.12.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Каменев С.В., Марусич К.В. Методика автоматизированного построения тепловой модели шпиндельного узла с использованием CAE-системы // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 621.9:517.958**

**Каменев Сергей Владимирович**

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Россия, Оренбург<sup>1</sup>  
Доцент кафедры «Технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов»  
Кандидат технических наук  
E-mail: kamenev\_sergey@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4333-3123>  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=534624](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=534624)  
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=36110189500>  
Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=9KmcYZkAAAAJ>

**Марусич Константин Викторович**

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Россия, Оренбург  
Доцент кафедры «Технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов»  
Кандидат технических наук  
E-mail: mkv82@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8825-6849>  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=631031](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=631031)  
Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=H5R6dOEAAAAJ>

**Методика автоматизированного  
построения тепловой модели шпиндельного  
узла с использованием CAE-системы**

**Аннотация.** Точность металлорежущего станка является одним из важнейших показателей его качества. Она определяется суммарной погрешностью обработки, складывающейся из нескольких составляющих, к числу которых относится температурная погрешность. Ее величина может достигать до 70 % в общем балансе погрешности обработки, что мотивирует производителей станков искать возможные пути ее снижения. Одним из таких путей является улучшение температурных характеристик шпиндельного узла станка. Сегодня оно достигается, главным образом, на основе математического моделирования в системах инженерного анализа, чему посвящено большое число современных исследований. Методики моделирования, предлагаемые различными авторами, имеют между собой много общего и подвержены ряду недостатков. Наиболее существенным из них выступает высокая трудоемкость построения модели. Настоящая работа направлена на преодоление этих недостатков путем разработки методики автоматизированного построения тепловой модели шпиндельного узла. В ее основу положено использование моделирующего сценария, написанного на внутреннем языке программирования системы инженерного анализа «ANSYS».

---

<sup>1</sup> 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, корп. 2, ауд. 2108 (кафедра ТММСК)

Данный сценарий автоматизирует все этапы построения модели и направляет действия пользователя системы инженерного анализа. Благодаря этому многократно снижается продолжительность моделирования, и значительно снижаются требования к квалификации пользователя. При этом обеспечивается приемлемая точность моделирования.

**Ключевые слова:** металлорежущий станок; шпиндельный узел; температурная погрешность; температурная характеристика; математическая модель; метод конечных элементов; система инженерного анализа

## Введение

Среди множества показателей качества металлорежущего станка определяющее значение имеет точность обработки. Количественной характеристикой точности станка выступает суммарная погрешность обработки, одним из компонентов которой является температурная погрешность. Температурная погрешность обработки на станке обусловлена температурными деформациями, которые вызываются перераспределением теплоты между конструктивными элементами станка, выделяемой различными источниками в процессе его работы. По данным различных исследований температурная погрешность может достигать до 70 % от суммарной погрешности обработки [5, 13, 14], и оказывает наиболее существенное влияние на точность обработанной детали на чистовых режимах работы, когда станок не подвержен воздействию значительных сил резания.

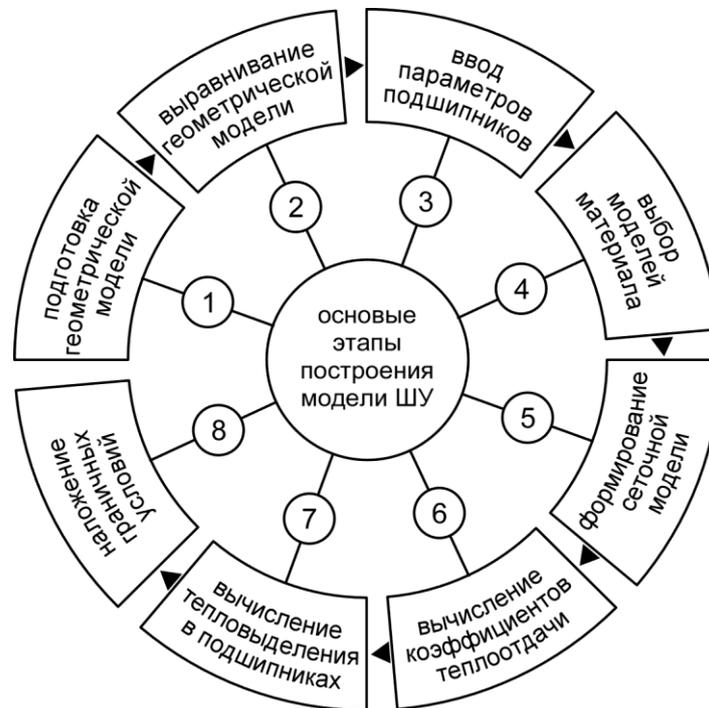
При этом одним из основных источников тепловыделения в станках являются современные шпиндельные узлы (ШУ) на опорах качения, постоянно растущие скорости вращения которых приводят к существенному теплообразованию в опорах вследствие потерь мощности на трение. По этой причине производители металлорежущих станков стремятся оценить тепловое состояние шпиндельного узла еще на этапе проектирования станка, чтобы иметь возможность предотвратить связанные с ним нежелательные эффекты. Как показывает обзор различных источников, посвященных данной теме, наиболее распространенным подходом к такой предварительной оценке тепловых характеристик является инженерный анализ шпиндельного узла с использованием универсальных CAE-систем, основанных на методе конечных элементов [2, 3].

В общем случае, названный подход предполагает выполнение последовательности таких этапов, как построение твердотельной геометрической модели ШУ, формирование его сеточной модели, наложение начальных и граничных условий, проведение расчетов и анализ полученных результатов. При этом реализация перечисленных этапов связана с рядом проблем, основные из которых могут быть сформулированы следующим образом:

- большая трудоемкость подготовки математической модели ШУ, что, в первую очередь, определяется высокой сложностью наложения начальных и граничных условий, которые требуют большого объема предварительных ручных вычислений на основе эмпирических формул и справочных данных;
- инвариантность наложенных на модель граничных условий, которая при изменении учитываемых в модели параметров работы ШУ (например, частоты вращения) приводит к необходимости повторения всего объема работ по наложению граничных условий;
- высокий уровень требований, предъявляемых к квалификации инженера-расчетчика, которая в условиях станкостроительного предприятия может оказаться недостаточной для создания корректной модели ШУ и проведения его полноценного инженерного анализа.

## Методика моделирования

В качестве решения отмеченных проблем может быть предложена методика построения тепловой модели ШУ путем специализации известной CAE-системы «ANSYS» на основе моделирующего сценария, разработанного на ее встроенном языке программирования APDL (Ansys Programming Design Language). В этом случае процесс подготовки модели может быть значительно упрощен за счет автоматизированного выполнения последовательности этапов, указанных на рис. 1.



**Рисунок 1.** Последовательность построения тепловой модели шпиндельного узла (разработано авторами)

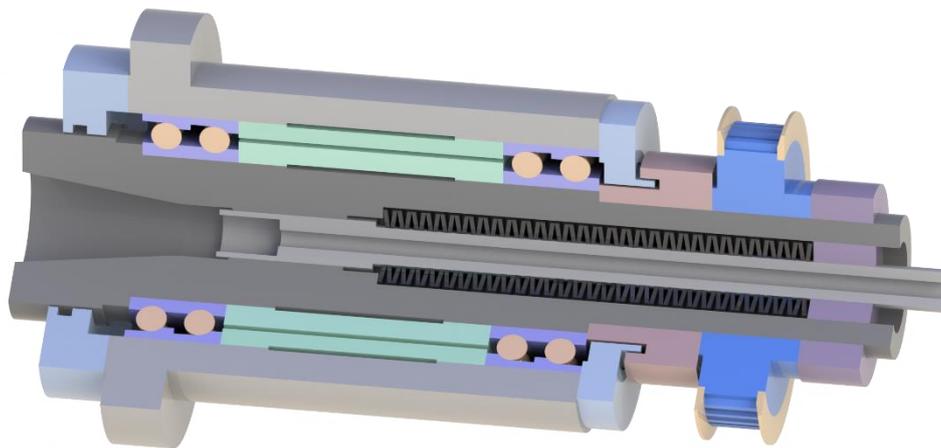
Как видно на приведенном рисунке, начальным этапом моделирования является формирование геометрии модели, которая может быть получена как средствами препроцессора «ANSYS», так и импортирована из сторонней CAD-системы.

Корректная работа сценария предполагает использование сборочной геометрической модели ШУ, включающей в себя твердотельные модели шпинделя и всех непосредственно связанных с ним деталей и узлов (подшипники, зубчатые колеса, втулки и т. д.). При этом модель должна удовлетворять следующим основным условиям:

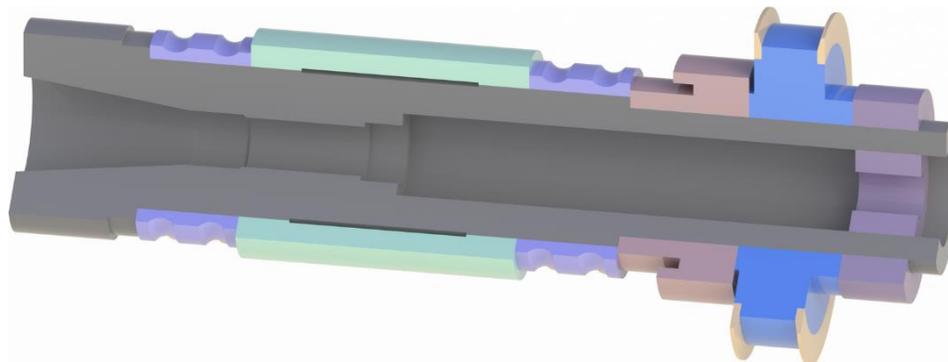
- все компоненты модели должны являться осесимметричными телами вращения, имеющими общую ось;
- нормальное расстояние между сопряженными поверхностями компонентов должно равняться нулю;
- геометрия модели каждого из подшипников качения должна воспроизводиться лишь его кольцом, сопряженным со шпинделем, при обязательном наличии на этом кольце дорожки качения;
- в модели должны присутствовать только те компоненты ШУ, которые обладают суммарной площадью своих поверхностей, способной заметно повлиять на теплообмен с другими компонентами и окружающей средой.

Например, для шпиндельного узла сверлильно-фрезерно-расточного станка модели 400V (производитель ОАО «Стерлитамакский станкостроительный завод»), конструкция которого изображена на рис. 2, его геометрическая модель, удовлетворяющая указанным требованиям, приведена на рис. 3. Обе модели на приведенных рисунках для их лучшего восприятия показаны в разрезе.

Геометрическая модель ШУ, удовлетворяющая указанным условиям, позволяет применить к ней моделирующий сценарий, который автоматизирует все последующие этапы моделирования. Первым из них является процедура выравнивания модели, заключающаяся в автоматическом задании определенного положения и ориентации шпинделя в текущей системе координат, независимо от исходной конфигурации модели, импортированной в САЕ-систему «ANSYS» (или созданной в ней). Процедура выполняется в полностью автоматическом режиме, и основана на вычислении координат центров масс для всех поверхностей геометрической модели.



*Рисунок 2. Конструкция шпиндельного узла станка модели 400V (разработано авторами)*



*Рисунок 3. Геометрическая модель ШУ, подготовленная для теплового моделирования (разработано авторами)*

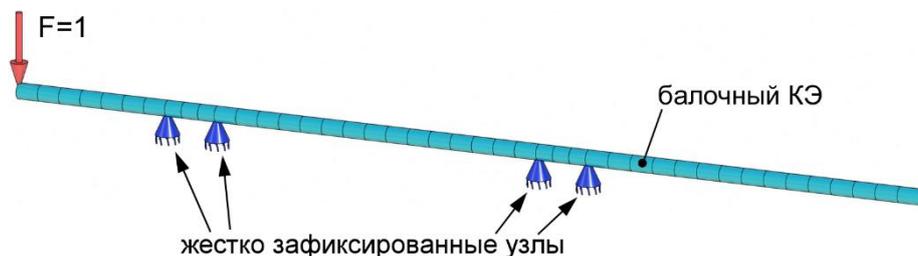
Дальнейший процесс построения модели реализуется при допущении того, что стыки между сопряженными деталями ШУ являются идеальными. Поэтому на текущем этапе моделирования производится автоматическое булево «склеивание» сопряженных деталей ШУ. Его результатом выступают поверхности, лежащие на границе двух тел и одновременно принадлежащие обоим телам. Допущение идеальных стыков позволяет значительно упростить модель ШУ при обеспечении приемлемых результатов моделирования.

На следующем этапе построения модели требуется в интерактивном режиме выполнить ряд действий, результат которых позволяет задать параметры подшипников качения. К этим действиям относятся:

- ввод общего числа подшипников, установленных на шпинделе;
- интерактивный выбор твердотельного компонента модели, соответствующего каждому кольцу подшипника;
- ввод параметров каждого подшипника, которыми являются код типа подшипника, код серии подшипника, средний диаметр подшипника, число рядов тел качения, угол контакта, статическая грузоподъемность и осевая нагрузка.

Помимо перечисленных параметров полное определение подшипника также включает в себя величину воспринимаемой им радиальной нагрузки. Для радиальных и радиально-упорных подшипников она определяется путем автоматического вычисления реакций, которые возникают в опорах под воздействием радиальной составляющей силы резания. Радиальная нагрузка на упорные подшипники по умолчанию принимается равной нулю.

Расчет реакций производится с использованием специальной балочной модели, которая автоматически генерируется по ходу выполнения сценария. Основой для ее генерации служат осевые размеры шпиндельного узла. Пример такой модели, полученной для рассматриваемой конструкции ШУ, приведен на рис. 4.



**Рисунок 4.** Балочная модель шпинделя, используемая для вычисления реакций в опорах (разработано авторами)

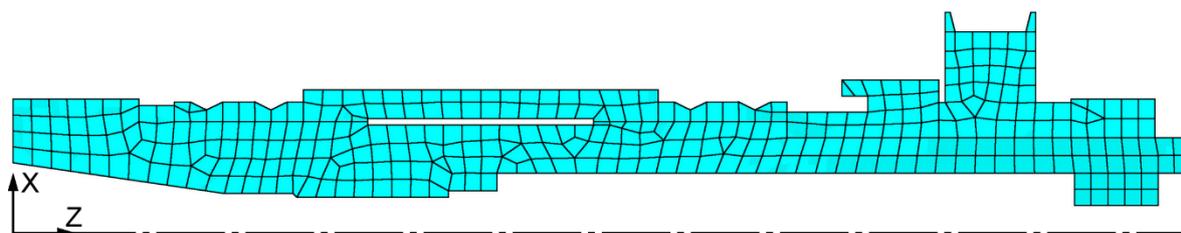
Вычисленные реакции сохраняются в базу данных модели как коэффициенты, сумма которых равна единице. Далее эти коэффициенты используются для определения фактических радиальных нагрузок на подшипники путем умножения этих коэффициентов на заданную величину радиальной силы резания.

Следующий этап выполнения сценария связан с автоматическим определением моделей материалов, характеризующих теплофизические свойства деталей ШУ. По умолчанию формируются десять моделей материалов, которые характеризуют различные марки отечественных и зарубежных сталей, наиболее распространенных в практике конструирования ШУ. При определении каждого материала принимается, что он является изотропным и задается коэффициентом теплопроводности, плотностью и удельной теплоемкостью в функции температуры. Идентификация материалов в базе данных модели производится путем назначения им числовых кодов.

Назначение материалов деталям ШУ производится при помощи специальной интерактивной процедуры, число повторов которой равно числу материалов, используемых в конструкции ШУ. Каждый повтор включает в себя интерактивный ввод номера требуемой модели материала и последующий ручной выбор соответствующих деталей ШУ. В зависимости от назначенных материалов детали автоматически сохраняются в именованные компоненты, что в дальнейшем позволяет при необходимости легко заменить тот или иной используемый материал.

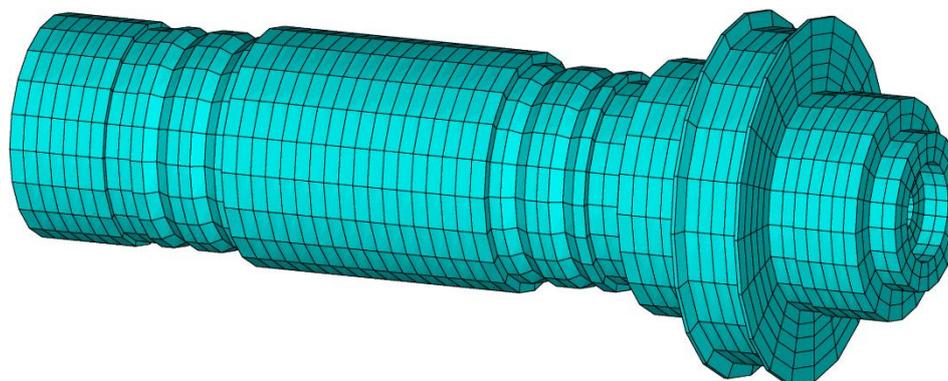
Этап формирования сеточной модели выполняется в полностью автоматическом режиме, и начинается с булевого сечения геометрической модели ШУ плоскостью, проходящей через ось шпинделя. Его результатом является набор плоских поверхностей, на которые

наносится сетка конечных элементов типа «Shell57» из библиотеки элементов САЕ-системы «ANSYS». Средний размер элементов автоматически рассчитывается исходя из общей площади сечения, и управляется соответствующим параметром. Плоская сетка, полученная для рассматриваемой конструкции шпинделя, приведена на рис. 5.



**Рисунок 5.** Конечно-элементная сетка в осевом сечении модели (разработано авторами)

Полученная плоская сетка служит основой для генерации сетки объемных элементов типа «Solid70», для чего к ней применяется операция заметания относительно оси шпинделя. При этом предусматривается параметр, задающий угловой шаг элементов сетки. В ходе генерации объемной сетки плоские элементы автоматически удаляются за их дальнейшей ненужностью. Для рассматриваемого примера сеточная модель ШУ будет иметь, показанный на рис. 6.



**Рисунок 6.** Сетка объемных элементов (разработано авторами)

Далее по ходу сценария предусмотрен блок команд, отвечающих за вычисление коэффициентов теплоотдачи на свободных поверхностях ШУ. При этом перед непосредственным вычислением коэффициентов производится автоматическая идентификация свободных цилиндрических (конических) и торцевых поверхностей, на которых должны задаваться условия конвективного теплообмена. По результатам идентификации в базе данных модели создаются два массива данных, в которые записываются номера и геометрические параметры поверхностей. В случае цилиндрических (конических) поверхностей такими параметрами выступают средние радиусы их круговых кромок, а в случае торцевых поверхностей – внутренние и наружные радиусы их граничных круговых кромок.

Идентифицированные поверхности затем используются для наложения на них граничных условий, определяющих условия конвективного теплообмена с окружающей средой. Количественно эти условия задаются значениями коэффициентов теплоотдачи, автоматически рассчитываемыми в соответствующем блоке сценария.

Для этого в базу данных модели сначала интерактивно вводятся значения скорости вращения шпинделя и температуры окружающей среды, которая по умолчанию также определяет начальную температуру ШУ. На основе заданной температуры среды (воздух) далее вычисляется набор параметров, характеризующих ее теплофизические свойства (плотность, кинематическая вязкость, теплопроводность, удельная теплоемкость и коэффициент объемного

расширения). Автоматический расчет их значений производится на основе зависимостей, приведенных в работе [6].

Вычисленные значения, в свою очередь, используются для вычисления нескольких критериев подобия, включающих число Прандтля, число Рейнольдса, число Грасгофа и числа Нуссельта. При этом значения числа Нуссельта для цилиндрических и плоских торцевых поверхностей рассчитываются с использованием эмпирических зависимостей, приведенных в работах [8, 11, 12]. На основе полученных значений числа Нуссельта для каждой теплоотдающей поверхности ШУ автоматически рассчитывается коэффициент теплоотдачи и записывается в соответствующий массив данных.

Следующий блок команд в сценарии связан с идентификацией тепловыделяющих поверхностей и расчетом мощностей тепловыделения. В качестве тепловыделяющих поверхностей рассматриваются поверхности, соответствующих дорожкам качения подшипниковых колец. Поиск этих поверхностей производится в автоматическом режиме на основе последовательного исключения поверхностей, принадлежащих каждой модели подшипникового кольца.

По завершению идентификации тепловыделяющих поверхностей определяются параметры источников тепловыделения, которыми в шпиндельных узлах являются подшипники качения. Его начальной стадией является интерактивный выбор типа системы смазывания подшипниковых опор. Для выбора доступны четыре системы смазывания (пластичная смазка, масляный туман, масляная ванна и впрыск), кодируемых числовым идентификатором.

Далее в соответствии с выбранной системой смазывания в диалоговом режиме выбирается вид смазочного материала. При этом возможен выбор двух его типов: пластичной (консистентной) и жидкой смазки. Каждый тип включает в себя несколько существующих марок смазочного материала, выбираемых путем ввода соответствующего числового кода. В качестве основной характеристики выбранного смазочного материала рассматривается его кинематическая вязкость, функционально зависящая от температуры. Значения этой функции автоматически рассчитываются на основе технических характеристик смазочных материалов и эмпирических зависимостей, приведенных в работах [1, 9, 10].

Полученные значения используются для вычисления мощностей тепловыделения в подшипниках, что осуществляется через расчет моментов трения. В настоящее время для оценки момента трения, возникающего в подшипнике качения, используются различные математические модели, однако, как показал проведенный обзор литературы, наиболее распространенной моделью для вычисления момента трения в подшипниках качения является модель Пальмгрена [4, 7].

Согласно данной модели полный момент трения в подшипнике складывается из двух компонентов, а именно не зависящего от нагрузки и зависящего от нее. Величины этих компонентов по ходу выполнения сценария для каждого подшипника автоматически рассчитываются на основе ранее заданных параметров с использованием формул и справочных данных, приведенных в работах [4, 7]. При этом в сценарий интерактивно вводится величина радиальной силы резания, которая используется для пересчета радиальных нагрузок, приходящихся на подшипники. После определения величин полных моментов трения вычисляются значения мощности тепловыделения, и записываются в соответствующие массивы, как функция температуры. Количество таких массивов со значениями тепловой нагрузки соответствует числу подшипников.

На завершающем этапе построения модели, подготовленные массивы со значениями коэффициентов теплоотдачи и мощностей тепловыделения используются для автоматического

задания граничных условий на поверхностях расчетной модели. При этом поверхности на стыках деталей автоматически исключаются. Данная процедура завершает процесс автоматизированного построения модели ШУ, которая может быть использована для последующего анализа его тепловых характеристик в САЕ-системе «ANSYS».

### Выводы

Особенности предлагаемого подхода к построению тепловых моделей ШУ позволяют выделить ряд его достоинств, которые отличают его от аналогичных методик, предложенных в работах других авторов. К ним относятся:

- сокращение до минимума времени, затрачиваемого на построение модели, например, для рассматриваемого ШУ станка мод. 400V полное время построения модели составляет около 3 мин. (при использовании компьютера Intel Core i5 3,4 ГГц с ОЗУ 8 ГБ), в то время как при традиционном подходе оно составит не менее нескольких часов;
- исключение ошибок определения коэффициентов теплоотдачи и мощностей тепловыделения для множества поверхностей, которые могут иметь место при традиционном подходе к моделированию (предварительный расчет вручную либо с привлечением вспомогательных программных средств);
- исключение необходимости использования большого объема справочной литературы, требуемой для определения всех условий конвективного теплообмена и теплофизических свойств материалов;
- как следствие трех вышеупомянутых пунктов, снижение требований к уровню квалификации инженера-расчетчика, осуществляющего тепловое моделирование ШУ в САЕ-системе;
- возможность быстрой модификации полученной тепловой модели ШУ для проведения других актуальных видов инженерного анализа, таких как статический, модальный и гармонический анализ;
- хорошая сходимость результатов моделирования, получаемых на основе предлагаемого подхода, с результатами натурных экспериментов. Так, например, для рассматриваемого ШУ погрешность расчета температуры переднего конца шпинделя, установившейся в течение 8 часов его непрерывной работы с частотой вращения 3000 мин.<sup>-1</sup>, не превысила 4,5 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев, И. А. Исследование тепловых характеристик высокоскоростного шпинделя / И. А. Зверев, Чжо У // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 3 (38). – С. 14-21.
2. Каменев, С. В. Современные методы компьютерного моделирования и инженерного анализа тепловых характеристик шпиндельных узлов / С. В. Каменев, К. В. Марусич // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Том 9. – №5. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/32TVN517.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения 31.10.2017).
3. Поляков, А. Н. Расчет статических, динамических и тепловых характеристик шпиндельных узлов в системе ANSYS / Поляков А. Н., Каменев С. В. // Технология машиностроения. – 2006. – №7. – С. 64-69.
4. Перель, Л.Я. Справочник – Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. / Л. Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.
5. Boundary Conditions Optimization of Spindle Thermal Error Analysis and Thermal Key Points Selection Based on Inverse Heat Conduction / Y. Li [at al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90, Issue 9-12. – P. 2803-2812.
6. Dixon, J. C. The Shock Absorber Handbook. Second Edition / J. C. Dixon. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2007 – 432 p. – ISBN: 978-0-470-51020-9.
7. Harris, T. A. Essential Concepts of Bearing Technology / T. A. Harris, M. N. Kotzalas. – Fifth Edition. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. – 376 p.
8. Howey, D. A. Air-Gap Convection in Rotating Electrical Machines / D. A. Howey, P. R. N. Childs, A. S. Holmes // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012. – Volume 59, Issue 3. – P. 1367-1375.
9. Kim, J. D. Thermal Model of High-Speed Spindle / J. D. Kim, I. Zverev, K. B. Lee // Intelligent Information Management, 2010. – Volume 2. – P. 306-315.
10. Knezevic, D. Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems / D. Knezevic, V. Savic // Mechanical Engineering, 2006. – Volume 4. – №1. – P. 27-34.
11. Kreith, F. Principles Of Heat Transfer. Seventh Edition / F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Bohn. – Boston: Cengage Learning, Inc., 2011. – 696 p. – ISBN-978-0-495-66770-4.
12. Jääskeläinen, M. Determination of coefficients of thermal convection in a high-speed electrical machine: Master's thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology / M. Jääskeläinen. – Helsinki: Helsinki University of Technology, 2009. – 56 p.
13. Ramesh Babu. S. Simulation of Temperature Distributions of CNC Lathe Headstock Assembly / S. Ramesh Babu, S. Dhamotharan // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering. – 2014. – Volume 14. – № 6. – P. 99-103.
14. Thermal-Structure Characteristics Coupling Analysis of Spindle System for Horizontal CNC Machining Center / X. Deng [at al.] // Proceedings of 10th international symposium of measurement technology and intelligent instruments / KAIST, Daejeon, June 29-July 2, 2011. – 6 p.

**Kamenev Sergey Vladimirovich**

Orenburg state university, Russia, Orenburg  
E-mail: kamenev\_sergey@mail.ru

**Marusich Konstantin Victorovich**

Orenburg state university, Russia, Orenburg  
E-mail: mkv82@mail.ru

## **Method for automated building of a spindle thermal model with use of CAE system**

**Abstract.** The accuracy of a metal-cutting machine tool is one of the most important indices of its quality. It is determined by the total machining error which consists of several components including the thermal error. Its value can reach up to 70 % in the overall balance of the machining error and this makes machine tool manufacturers look for possible ways to reduce it. One of such ways is an improvement of thermal behaviour of the machine tool spindle. Today it is mainly achieved on the base of mathematical modelling that is performed in computer aided engineering software which is the subject of a large number of modern researches. Methods of modelling that is proposed by various authors have a lot common features and are subjected to several disadvantages. The most significant of them is the high labour intensiveness. The present article is addressed to overcoming these disadvantages by developing a method for the automated building of required spindle models. The basis of this method is the use of modelling script that is written in the inner programming language of commercial computer aided engineering software «ANSYS». This script automates all stages of the model building and directs the actions of the user. As a result the labour intensiveness is decreased in many times over and the skill requirements for user are greatly reduced. At the same time it is provides the acceptable accuracy of modelling.

**Keywords:** machine tool; spindle unit; thermal error; thermal behavior; mathematical model; finite element analysis; computer aided engineering