

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Институт прикладной математики и механики**

На правах рукописи

Зайцева Надежда Игоревна

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАЗОРОВ
МЕЖДУ СОЕДИНЯЕМЫМИ ЧАСТЯМИ ПРИ СЕРИЙНОМ
СБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Направление подготовки: 09.06.01 Информатика и вычислительная техника

Код и наименование

Направленность: 09.06.01_09 «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Зайцева Н. И.

Научный руководитель:
доцент, к.ф.-м.н., Лупуляк С.В.

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в «Высшей школе прикладной математики и вычислительной физики» Института прикладной математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Дир. ВШ ПМиВФ:

Уткин Лев Владимирович,
д.т.н., профессор.

Научный руководитель:

Лупуляк Сергей Валерьевич,
к.ф.-м.н., доцент, СПбПУ.

Рецензенты:

Смирнов Александр Борисович,
к.ф.-м.н., инженер НИЛ
Виртуально-имитационного
моделирования, СПбПУ.

Шиндер Юлия Константиновна,
к.ф.-м.н., инженер НИЛ
Виртуально-имитационного
моделирования, СПбПУ.

Фёдоров Александр Евгеньевич,
к.т.н., начальник проекта, ООО
"ДизайнСофт".

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Высокий спрос на популярные модели самолетов и ограниченное количество сборочных линий побуждают крупных производителей гражданских самолетов интенсифицировать процесс сборки путем поиска более быстрых и эффективных технологий. Одним из самых популярных методов такого поиска является математическое моделирование сборочных процессов, позволяющее всесторонне проанализировать полезность предлагаемых изменений еще до внедрения их на реальном производстве.

Несмотря на попытки роботизировать производство, большинство сборочных операций до сих пор производится вручную. На механическую установку крепежных элементов приходится около 60% всей стоимости сборки самолета и 80% всех выявляемых дефектов. Ускорение этих процедур может сильно сказаться на эффективности производственных линий. Вместе с тем, изменение сборочной технологии легко может привести к снижению качества и возникновению непредвиденных производственных дефектов. Для предотвращения таких ситуаций используется численное моделирование сборочного процесса как инструмент для прогнозирования качества сборочных операций и оценки вероятности появления производственных дефектов.

Современные авиационные конструкции преимущественно собираются из крупногабаритных гибких частей сложной формы. Именно поэтому, чтобы добиться высокого качества клепочного соединения, процесс сборки деталей разбивается на несколько последовательных стадий. На первой стадии производится соединение деталей с помощью *временных крепежных элементов* (ВКЭ). ВКЭ устанавливаются для того, чтобы свести зазор между деталями к минимуму перед проведением последующих операций сверления. Если зазор между деталями сведен недостаточно, то в процессе дальнейшего сверления отверстия могут получиться несоосными, и, кроме того, сильно возрастает

вероятность попадания стружки между соединяемыми поверхностями. В процессе эксплуатации такие дефекты могут привести к повышенным механическим напряжениям в конструкции самолёта и вызвать усталостные явления вплоть до развития трещин.

Для каждого соединения расстановка ВКЭ производится рабочими по заданному *шаблону* ВКЭ, который определяет, в какие отверстия нужно установить крепежные элементы. Чем меньше крепежных элементов предусмотрено шаблоном, тем быстрее производится сборка. При этом, однако, значение зазора между деталями не должно превышать допустимого значения. Разработка и модификация шаблонов ВКЭ с помощью численного моделирования является одним из активно используемых путей оптимизации сборочного производства. Ускорение текущих технологий требует разработки более экономичных шаблонов ВКЭ вместе с сохранением высокого уровня качества собираемых конструкций.

Шаблон ВКЭ должен учитывать не только геометрию деталей, но еще и неизбежные в реальном производстве сборочные отклонения. Для сборочного процесса в качестве источников отклонений рассматривают отклонения деталей (например, вариации формы поверхности соединяемых деталей из-за естественных погрешностей производственных процессов) и отклонения сборочного процесса (например, неточности позиционирования и закрепления).

Все эти случайные отклонения влияют на зазор между деталями после установки крепежных элементов. На практике для каждого собираемого самолета значения зазора будут каким-то случайным образом отличаться от нулевого значения.

Данная работа посвящена разработке процедуры анализа шаблона ВКЭ с учетом возможных сборочных отклонений, которая позволяет:

- проверять, насколько качественно шаблон ВКЭ будет сводить зазор между деталями;
- определять слабые места шаблона (области, где зазор сводится недостаточно хорошо);

- количественно сравнивать эффективность разных шаблонов.

Методы анализа сборочных процессов активно разрабатываются как для авиационной, так и в автомобильной промышленности. Наиболее общим подходом к анализу вариаций сборочных процессов с учетом случайности отклонений является использование статистического моделирования, основанного на методе Монте-Карло. На различных модификациях этого подхода основано большинство исследовательских работ, посвященных этой теме. Однако предлагаемые методы применительно к рассматриваемой задаче характеризуются или большими затратами времени, или сложностью проведения практического анализа, или невысокой точностью получаемых результатов. В данной работе стандартный подход адаптируется с учетом особенностей задачи анализа шаблона ВКЭ для получения быстрого и качественного инструмента численного анализа.

В предлагаемой адаптации сборочные отклонения учитываются через задание начального зазора между деталями. Этот зазор передает расстояние между поверхностями деталей, появившееся из-за их случайных отклонений от номинальной геометрии без учета возможности контактного взаимодействия между деталями. В большинстве случаев для анализа доступно только небольшое количество измерений этого зазора между собираемыми деталями. Тогда возникает необходимость построения математической модели начального зазора для получения большого числа реализаций начального зазора и, соответственно, проведения статистического моделирования по методу Монте-Карло.

Цели и задачи исследования

Цель данной работы – это комплексная разработка подхода к анализу шаблона ВКЭ с учетом сборочных отклонений для процессов сборки авиационных конструкций.

Для достижения этой цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать процедуру анализа шаблона ВКЭ для предсказания качества соединения деталей на основе моделирования контактного взаимодействия и с учетом сборочных отклонений через начальный зазор между деталями.
2. Разработать алгоритм моделирования начального зазора на основе модели случайного поля. Построить оценки параметров модели по малому набору измерений и определить метод получения новых реализаций начального зазора.
3. Разработать алгоритм моделирования начального зазора на основе собственных форм собираемых деталей. Разработать методы оценки и подбора оптимальных параметров построенной модели. Получить процедуру генерации новых реализаций зазора.
4. Исследовать работу построенных моделей начального зазора в случае малого набора измерений. Выбрать критерии для сравнения генерируемых и измеренных зазоров. Сравнить результаты анализа шаблона ВКЭ в случае использования набора измеренных и набора сгенерированных начальных зазоров. Выявить более эффективный метод моделирования начального зазора в ситуации ограниченного количества измерений.
5. Разработать набор статистических критериев для оценки и анализа качества рассматриваемого шаблона.
6. Внедрить процедуру анализа шаблона ВКЭ в специализированный программный комплекс по моделированию процесса сборки деформируемых конструкций.

Объекты, (предмет) и методы исследований.

Объектом исследования является шаблон ВКЭ, разрабатываемый для использования в серийном сборочном производстве с целью уменьшения зазора между соединяемыми деталями.

Предметом исследования является методы анализа сборочных процессов с учетом возможного присутствия случайных сборочных отклонений, позволяющие с помощью численного моделирования предсказать и проанализировать качество шаблона ВКЭ. Также предметом исследования являются методы моделирования

начального зазора, позволяющие получать реализации начального зазора в случае ограниченности доступного набора измерений.

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались методы вычислительной механики, функционального анализа, математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики. Для внедрения разработанной процедуры анализа шаблона ВКЭ в программный комплекс ASRP был использован язык программирования C++. Исследования эффективности методов моделирования начального зазора проводились в программной среде MATLAB и в программном комплексе ASRP.

Научная новизна результатов:

1. Разработана процедура анализа шаблона ВКЭ с учетом сборочных отклонений, позволяющая оценить качество соединения деталей для рассматриваемого шаблона.
2. Предложены специальные статистические критерии, позволяющие провести анализ шаблона ВКЭ относительно различных технических требований, заданных для сборочного процесса.
3. Впервые разработаны модели начального зазора на основе случайного поля и на основе собственных форм собираемых деталей.
4. Исследовано поведение разработанных моделей в случае ограниченного набора измерений, и определена наиболее эффективная модель для использования в процедуру анализа шаблона ВКЭ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость работы составляют: разработанные модели начального зазора; теоретически построенные оценки параметров модели начального зазора на основе случайного поля; разработанные оценки параметров для модели начального зазора на основе базиса из собственных форм; предложенный метод подбора оптимального количества используемых базисных функций для этой модели.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования предложенных методов для анализа шаблонов ВКЭ с учетом сборочных отклонений. Предложенная процедура была внедрена в программный комплекс ASRP как специальная функциональность для анализа сборочного процесса. Работа над диссертацией велась в 2016-2020 гг. в рамках совместных проектов СПбПУ и AIRBUS. Разработанная процедура анализа шаблона была успешно применена для решения ряда практических задач, связанных с разработкой и оптимизацией шаблонов для реальных сборочных процессов.

Представление научного доклада: основные положения, выносимые на защиту

1. Процедура анализа шаблона ВКЭ, позволяющая оценить и проанализировать качество соединения деталей.
2. Набор специальных критериев, позволяющих определить качество шаблона ВКЭ относительно заданных технических требований.
3. Две разработанные модели начального зазора: на основе случайного поля и на основе собственных форм собираемых деталей.
4. Результаты сравнения работы моделей начального зазора в случае ограниченного набора исходных данных, позволяющие выбрать наиболее эффективную модель начального зазора для использования в процедуре анализа сборочного процесса при ограниченном количестве измерений.

Степень достоверности результатов

Достоверность разработанных моделей начального зазора подтверждается сравнением полученных зазоров с измеренными данными. Достоверность результатов применения разработанной процедуры анализа ВКЭ подтверждается результатами технологических проверок и экспериментов, проведенных на производстве.

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы докладывались:

- на международной конференции «SAE Aerotech Europe 2019» (Бордо, Франция, 2019);
- на российской конференции «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2018» (Челябинск, Россия, 2018);
- на российской конференции «Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2017)» (Переславль-Залесский, Россия, 2017);
- на международной конференции «The 19th European Conference on Mathematics for Industry» (Сантьяго-де-Компостела, Испания, 2016);
- на российской конференции «XLI Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, Россия, 2016);
- на семинарах НИЛ «Виртуально-имитационного моделирования», 2016-2020 (Санкт-Петербург, Россия).

Публикации

Результаты диссертационной работы отражены в 10 публикациях, в том числе 8 публикациях в изданиях из перечня Scopus и Web of Science.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования. Сформулирована поставленная цель и перечислены основные задачи исследования. Выбраны методы исследования. Обозначены научная новизна диссертационного исследования, его теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе детально изложена актуальность разработки процедуры анализа шаблона временных крепежных элементов (ВКЭ) с учетом сборочных отклонений. Описан наиболее общий подход к анализу сборочных процессов, основанный на статистическом моделировании по методу Монте-Карло. Идея такого подхода – это моделирование как можно большего количества ситуаций, которые могут реализоваться на практике из-за присутствия случайных отклонений. В тексте дан обзор различных методов модификации такого стандартного подхода и определены их недостатки. Приводится обоснование выбора предлагаемой адаптации стандартного подхода, которая позволяет получить эффективный инструмент для анализа шаблона ВКЭ.

Предложенная адаптация основана на моделировании сборочного процесса через решение контактной задачи в вариационной постановке. Такой метод позволяет быстро и точно решать контактную задачу с учетом деформации и контактного взаимодействия деталей. В этом случае исходные сборочные отклонения задаются как *начальный зазор* между деталями. В результате решения контактной задачи определяются значения *конечного зазора* между деталями после установки ВКЭ.

Начальный зазор — это скалярная функция $G(x, y), (x, y) \in \Omega$, модуль которой передает расстояние между соединяемыми деталями в зоне стыка $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ без их контактного взаимодействия. Поскольку детали могут отклоняться от номинального положения в любую сторону, вполне возможна ситуация, когда из-за получившихся изгибов детали должны были бы проникнуть друг в друга (см. Рисунок 1а). Там, где детали не касаются друг друга, начальный зазор считается

положительным; а там, где детали отклоняются так, что стремятся проникнуть друг в друга, он считается отрицательным.

Моделирование контактного взаимодействия позволяет определить, как исходные изгибы деталей (складывающиеся в начальный зазор между ними) влияют на физические перемещения этих деталей в процессе сборки, и, соответственно, на конечный зазор $g(x, y)$ между ними (см. Рисунок 1б).

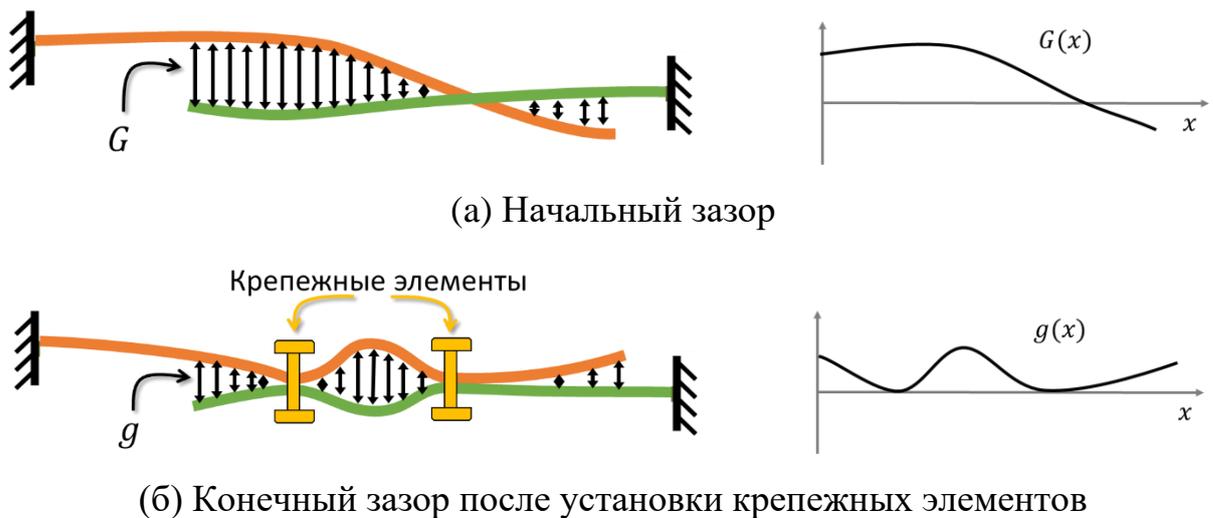


Рисунок 1. Иллюстрация начального и конечного зазоров между деталями

Проведение статистического моделирования состоит в решении контактной задачи для большого набора реализаций начального зазора. После проведенных расчетов полученные значения конечных зазоров анализируются статистическими методами для оценки качества соединения деталей.

В некоторых случаях количество доступных для анализа измерений начального зазора недостаточно для проведения процедуры статистического моделирования. Поэтому для построения универсальной процедуры анализа шаблона ВКЭ в работе предложено разработать математическую модель начального зазора. Построение модели позволяет получать сколь угодно большое число реализаций начального зазора.

После проведенного обзора методов моделирования сборочных отклонений в работе выбраны два наиболее перспективных подхода для построения модели начального зазора:

1. Метод на основе случайных полей. Этот подход представляется достаточно универсальным с точки зрения рассмотрения зазора как комбинации случайных отклонений любых деталей.
2. Метод на основе базиса из собственных форм деталей. Предполагается, что этот подход позволит использовать собственные формы как источник дополнительной информации о возможном характере начального зазора.

Во **второй главе** предложена модель начального зазора на основе случайного поля. Этот подход основан на том, что отклонение поверхности детали от номинальной геометрии можно моделировать как случайное поле. Тогда начальный зазор, как сумму отклонений поверхностей соединяемых деталей, тоже можно представить через некоторое случайное поле.

Модель начального зазора, предложенная в работе, имеет вид:

$$G_{RF}(x, y) = \mu(x, y) + \xi(x, y), (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

где $\mu(x, y)$ – детерминированная вещественная функция, которая моделирует регулярную компоненту зазора, а $\xi(x, y)$ – случайное поле, то есть скалярная случайная функция, зависящая от вещественных координат (x, y) и передающая случайную компоненту зазора.

Регулярная компонента $\mu(x, y) \in C^1(\Omega)$ считается гладкой функцией в зоне стыка и определяется через среднее значение зазора в каждой точке зоны стыка. Случайное поле $\xi(x, y)$ предполагается гладким, гауссовым, однородным и анизотропным полем с нулевым средним значением, дисперсией σ^2 и с экспоненциальной корреляционной функцией вида:

$$K(\vec{r}; \alpha, \beta) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\alpha^2 r_x^2}{2} - \frac{\beta^2 r_y^2}{2}\right), \quad r_x = |x_2 - x_1|, r_y = |y_2 - y_1|, \quad (2)$$

где \vec{r} – расстояние между парой точек зоны стыка (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , а два параметра (α, β) определяют корреляционные свойства случайного поля в направлении осей X и Y соответственно.

Набор параметров модели можно обозначить как $\theta_{RF} = \{\mu, \sigma^2, \alpha, \beta\}$, где функция $\mu \in C^1(\Omega)$, а числа $\sigma^2, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Для каждого параметра получен метод его оценивания по набору измерений начального зазора в дискретном числе точек.

После оценки параметров модели $G_{RF}(x, y)$, реализации начального зазора могут быть получены по формуле:

$$G_{RF}(x, y) = \hat{\mu}(x, y) + \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N_g}} \sum_{j=1}^{N_g} A_j [\sin(\chi_j x + \psi_j y) + \cos(\chi_j x + \psi_j y)], \quad (3)$$

где $\hat{\mu}(x, y)$ – оценка регулярной компоненты, $\hat{\sigma}$ – оценка дисперсии, а A_j и (χ_j, ψ_j) – реализации случайных величин A, χ, ψ , подобранных так, чтобы сумма гармоник аппроксимировала случайное поле $\xi(x, y)$. Для достижения необходимой точности аппроксимации число гармоник N_g берется достаточно большим: $N_g \sim 10^2$.

В третьей главе разработана модель начального зазора на основе разложения по базису из собственных форм соединяемых деталей. В начале главы описана процедура получения базисных функций $\{e_1(x, y), e_2(x, y), \dots\}, x \in \Omega$, для построения которых собственные формы деталей ортонормируются в пространстве $L_2(\Omega)$ с помощью алгоритма Грамма-Шмидта.

Предлагаемая модель начального зазора представляется как частичная сумма ряда Фурье вида:

$$G_{MD}(x, y) = \sum_{i=1}^K \lambda_i e_i(x, y), \quad (4)$$

где K – это число используемых базисных функций, а коэффициенты λ_i называются *модальными координатами*. Каждая модальная координата представляет собой вклад i -ой базисной функции в начальный зазор.

Для конкретного числа используемых базисных функций K получение численных реализаций начальных зазоров для этой модели основано на генерации случайных значений вектора модальных координат $\vec{\lambda} \in \mathbb{R}^K$. Считается, что этот вектор имеет нормальное распределение с математическим ожиданием $\vec{m} \in \mathbb{R}^K$ и корреляционной матрицей $\mathcal{K} \in \mathbb{R}^{K \times K}$:

$$\vec{\lambda} \sim \mathcal{N}(\vec{m}, \mathcal{K}). \quad (5)$$

Для оценки параметров \vec{m} и \mathcal{K} используется выборка значений модальных коэффициентов, полученная при разложении измеренных начальных зазоров в ряд (4). Генерируя случайные значения $\vec{\lambda}$, можно получать реализации начального зазора по формуле (4).

Для выбора оптимального числа базисных функций K предложена специальная процедура на основе сравнения полных вариаций измеренных зазоров и генерируемых зазоров.

В четвертой главе приведено детальное описание предлагаемой процедуры анализа шаблона ВКЭ на основе статистического моделирования. Разработанная процедура состоит из трех этапов:

Этап 1. Генерация начальных зазоров. На этом этапе генерируется набор из большого числа начальных зазоров. Генерация реализаций производится либо на основе моделирования начального зазора, либо на основе интерполяции измерений.

Этап 2. Моделирование сборочного процесса. На этом этапе для каждого начального зазора производится моделирование контактного взаимодействия деталей: с помощью решения контактной задачи рассчитываются перемещения деталей и, соответственно, определяются значения конечного зазора между деталями.

Этап 3. Статистическая оценка качества шаблона. По полученному набору значений конечных зазоров оцениваются статистические характеристики конечного зазора.

Для каждого этапа разработанной процедуры изложены основные особенности его практической реализации.

Для этапа генерации начальных зазоров предложен метод, позволяющий включить шероховатость поверхности деталей в модель начального зазора. Описанный метод делает возможным оценку влияния шероховатости на качество анализируемого шаблона.

Для этапа статистической оценки качества шаблона предложены специальные статистические критерии, позволяющие оценить и проанализировать качество шаблона ВКЭ. В работе предлагаются две статистические оценки качества. Первая из них – это *статистическая кривая*, определяющая вероятность того, что значение конечного зазора после установки ВКЭ не превысит величины $e \in \mathbb{R}$:

$$P(e) = Prob\{g(x, y) \leq e, \forall (x, y) \in \Omega\}. \quad (6)$$

Вторая оценка качества – это *локальная статистика*, оценивающая вероятность того, что конечный зазор превысит заданный допуск ε , для каждой точки зоны стыка в отдельности:

$$P_{loc}(x, y; \varepsilon) = Prob\{g(x, y) > \varepsilon\}. \quad (7)$$

Два предложенных инструмента вероятностной оценки качества шаблона ($P(e)$ и $P_{loc}(x, y; \varepsilon)$) позволяют решать все поставленные задачи анализа шаблона крепежных элементов, а именно:

- Проверить качество исследуемого шаблона – по значению $P(\varepsilon)$ определяется вероятность того, что конечный зазор не превысит технического допуска ε .
- Определить слабые места шаблона – с помощью локальной статистики $P_{loc}(x, y; \varepsilon)$.
- Сравнить эффективность различных шаблонов – через сравнение статистических кривых $P(e)$.

В **пятой главе** проведено сравнительное исследование построенных моделей начального зазора для оценки того, как количество доступных измерений влияет на применение этих моделей в качестве источника реализаций начальных зазоров для статистического анализа сборочной технологии. Исследование проводилось на примере установки ВКЭ в процессе присоединения крыла к фюзеляжу, поскольку набор доступных измерений для этого соединения достаточно велик и позволяет провести процедуру кросс-валидации результатов моделирования.

В этой главе сначала описано поведение оценок параметров моделей для малых наборов измерений. Проведено сравнение вероятностных характеристик сгенерированных и измеренных зазоров, показывающее точность моделирования относительно величины и полной вариации начального зазора. Исследования показали, что обе модели одинаково точно передают распределение величины начального зазора. Однако, модель на основе базиса из собственных форм G_{MD} значительно лучше передает значения полной вариации зазора для малых наборов исходных данных, чем модель G_{RF} .

Далее в работе проведено исследование того, как использование моделей зазора влияет на результат статистического анализа шаблона ВКЭ. Исходные измерения начальных зазоров были поделены на две равные части: на контрольный набор и на тренировочный набор (используемый для получения оценок параметров моделей начального зазора). Статистический анализ значений конечного зазора проводился для двух последовательных шагов сборочного процесса: до и после установки ВКЭ.

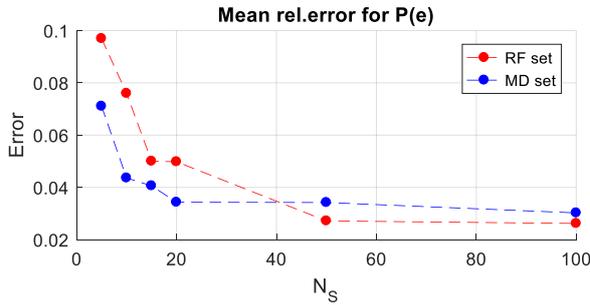
Степень эффективности использования сгенерированных зазоров для анализа шаблона определялась через погрешность полученных статистических кривых. Точным значением статистической кривой $P(e)$, $e \in \mathbb{Z}$ считалось значение, полученное из процедуры статистического моделирования, проведенной для измеренных начальных зазоров из контрольного набора. Погрешность приближения для этой статистической кривой оценивалась через относительное интегральное среднеквадратическое отклонение вида:

$$\delta(P, \hat{P}) = \left(\frac{\mathbb{E} \|\hat{P} - P\|^2}{\|\hat{P}\|^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{\mathbb{E} \int_{\mathbb{R}} (P(e) - \hat{P}(e))^2 de}{\int_{\mathbb{R}} P^2(e) de} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

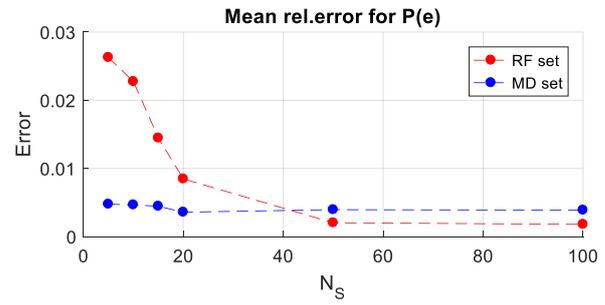
где в качестве оценки статистической кривой $\hat{P}(e)$ использовались кривые, полученный в процессе статистического моделирования на основе начальных зазоров из моделей G_{RF} и G_{MD} .

На Рисунке 2 приведен график полученных значений погрешностей $\delta(P, \hat{P})$ для моделей G_{RF} и G_{MD} в зависимости от числа доступных измерений N_S . Сравнение

полученных погрешностей показало, что для малого числа доступных измерений модель G_{MD} более точно передает значения статистической кривой.



(а) До установки ВКЭ



(б) После установки ВКЭ

Рисунок 2. Погрешность моделирования статистической кривой (8) в зависимости от размера тренировочной выборки N_s

В **шестой главе** описано несколько практических примеров применения разработанной процедуры анализа шаблона ВКЭ. На этих примерах показано, как предлагаемая процедура может быть использована для модификации и оптимизации шаблонов ВКЭ. Описан пример использования процедуры анализа шаблонов ВКЭ для определения того, как предлагаемые изменения шаблона скажутся на качестве сборочного процесса. Приведен пример, в котором применение предложенной процедуры анализа позволило разработать более эффективный шаблон ВКЭ.

На рассматриваемых примерах также был изложен подход к моделированию начального зазора в случае, когда для анализа доступны измерения только конечного зазора (зазора после установки крепежных элементов). В такой ситуации предложено использовать упрощенную модель начального зазора на основе случайного поля, которую можно описать набором трех числовых параметров — значением дисперсии $\sigma^2 \in \mathbb{R}$ и коэффициентами корреляционной функции $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Тогда подбор параметров модели начального зазора может быть реализован с помощью перебора. В качестве критерия для подбора параметров предлагается использовать близость статистических кривых, получаемых в результате анализа текущего шаблона и статистических кривых для измеренных конечных зазоров. С помощью построенных таким образом моделей можно получать наборы

реализаций начальных зазоров для проведения анализа шаблонов ВКЭ в случае отсутствия измерений начального зазора.

На последнем примере показано, как предложенная процедура может быть обобщена на случай соединения нескольких деталей. По результатам анализа можно определить, насколько качественно шаблон ВКЭ уменьшает зазор между каждой парой деталей. Также на этом примере проиллюстрировано, как возможная шероховатость соединяемых поверхностей может повлиять на качество соединения деталей.

В заключении приведены результаты и выводы, полученные в ходе выполнения настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования был разработан комплексный подход к анализу качества шаблона временных крепежных элементов с учетом сборочных отклонений. Предложенная процедура анализа представляет собой адаптацию стандартного подхода статистического моделирования сборочных процессов. Основными особенностями разработанной процедуры являются моделирование сборочного процесса на основе решения специального класса контактных задач и использование модели начального зазора для генерации необходимого числа реализаций сборочных отклонений. В ходе работы также были предложены специальные статистические критерии для оценки и анализа качества шаблона ВКЭ.

В ходе работы был проведен сравнительный анализ эффективности использования двух разработанных моделей начального зазора как источника зазоров для процедуры анализа шаблона ВКЭ. Проведенные исследования показывают, что в случае малого набора исходных данных модель на основе базиса из собственных форм позволяет получать более точные количественные оценки качества шаблона ВКЭ. Модель начального зазора как случайного поля дает менее точные результаты. Однако, с точки зрения применения этих моделей на практике, модель начального зазора на основе случайного поля более удобна, поскольку она может быть описана конечным набором численных параметров.

В рамках диссертационного исследования автором получены следующие результаты:

1. Разработана процедура анализа шаблона ВКЭ для предсказания качества соединения деталей.
2. Разработаны два алгоритма моделирования начального зазора: на основе модели случайного поля и на основе собственных форм собираемых деталей. Для каждой модели построены процедуры оценки параметров модели по доступному набору измерений и определен метод получения новых реализаций начального зазора.

3. Исследована работа построенных моделей начального зазора в случае малого набора измерений. Проведено сравнение результатов статистического анализа шаблона ВКЭ при использовании набора измеренных и набора сгенерированных начальных зазоров. Определено, что более эффективным методом получения набора реализаций начального зазора для статистического анализа является моделирование начального зазора на основе собственных форм деталей.
4. Разработан набор статистических критериев для оценки качества соединения деталей, позволяющих как сравнивать шаблоны, так и определять слабые места рассматриваемого шаблона.
5. Проведено внедрение процедуры анализа шаблона ВКЭ в специализированный программный комплекс ASRP.
6. Предлагаемая процедура анализа шаблонов ВКЭ была успешно применена к ряду практических задач, связанных с оптимизацией сборочных процессов.

Разработанная процедура анализа шаблона ВКЭ достаточно легко может быть обобщена на более широкий класс задач анализа сборочных процессов крупногабаритных деформируемых деталей. Перспективным направлением дальнейшего развития данного исследования представляется разработка подхода для более точного учета шероховатости соединяемых поверхностей.

**Список работ, опубликованных по теме научно-
квалификационной работы (диссертации)**

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, в том числе рецензируемых SCOPUS и Web of Science:

1. Lupuleac, S., Petukhova, M., Shinder, J., Smirnov, A., Stefanova, M., **Zaitseva, N.**, Pogarskaia, T., Bonhomme, E. Software Complex for Simulation of Riveting Process: Concept and Applications // SAE Technical Papers, 2016.
2. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Petukhova, M., Shinder, J., Berezin, S., Khashba, V., Bonhomme, E. Combination of Experimental and Computational Approaches to A320 Wing Assembly // SAE Technical Papers, 2017.
3. **Zaitseva, N.**, Lupuleac, S., Petukhova, M., Churilova, M., Pogarskaia, T., Stefanova, M. High Performance Computing for Aircraft Assembly Optimization // Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, 2018.
4. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Stefanova, M., Berezin, S., Shinder, J., Petukhova, M., Bonhomme, E. Simulation and optimization of airframe assembly process // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 2A, 2018.
5. Lupuleac, S., Smirnov, A., Churilova, M., Shinder, J., **Zaitseva, N.**, Bonhomme, E. Simulation of body force impact on the assembly process of aircraft parts // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 2B, 2019.
6. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Stefanova, M., Berezin, S., Shinder, J., Petukhova, M., Bonhomme, E. Simulation of the Wing-to-Fuselage Assembly Process // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 141, No, 6, 2019.
7. **Zaitseva, N.**, Pogarskaia, T., Minevich, O., Shinder, J., Bonhomme, E. Simulation of Aircraft Assembly via ASRP Software // SAE Technical Papers, 2019.

8. Lupuleac, S., Shinder, J., Churilova, M., **Zaitseva, N.**, Khashba, V., Bonhomme, E., Montero-Sanjuan, P. Optimization of Automated Airframe Assembly Process on Example of A350 S19 Splice Joint // SAE Technical Papers, 2019.

Публикации в других изданиях:

9. **Zaitseva N.**, Berezin S. A Methodology for Fasteners Placement to Reduce Gap Between the Parts of a Wing. // В сборнике: Quintela P. et al. (eds) Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2016. Mathematics in Industry, vol. 26. Springer, Cham. P. 769-776.
10. **Зайцева Н.И.**, Погарская Т.А. "Методология автоматической расстановки фиксирующих элементов для соединения частей крыла" // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та., 2015. С.39-41.

Аспирант _____ **Зайцева Н.И.**