

Прогнозирование геометрических параметров сборок изделий с использованием нейросетевых моделей

М.А. Болотов¹, В.А. Печенин¹, Н.В. Рузанов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Использование прогнозных моделей технологических процессов сборки ответственных изделий позволит обеспечить адаптивное управление сборкой на основе измеренной информации. Прямое моделирование процесса сопряжений с использованием численных моделей сопряжений и конечно-элементных моделей сборок требует существенных вычислительных ресурсов и зачастую сопровождается проблемами сходимости решений. Для решения приведенных проблем возможно использование нейросетевых моделей, описывающих основные закономерности процесса сопряжения на основе накопленных результатов. В работе приведена методика для прогнозирования точности сопряжения деталей на основе действительных геометрических моделей поверхностей. Действительные модели деталей представляют собой массивы точек их поверхностей. В методике используется разработанная модель, позволяющая производить расчет сборочных геометрических параметров деталей. Рассмотрены результаты моделирования сопряжения деталей диск и проставка ротора турбины. Для прогноза параметра «радиальное биение» в зависимости от величины и характера отклонения формы и величины натяга сопрягаемых поверхностей была создана и обучена радиально-базисная нейронная сеть.

1. Введение

Сложные промышленные и наукоёмкие изделия характеризуются высокими требованиями к геометрической точности деталей и сборочных единиц. К таким изделиям относятся современные авиационные двигатели, к которым предъявляются высокие требования по надежности, минимальной массе, экономичности и ресурсу. Перечисленные характеристики обеспечиваются в том числе благодаря совершенствованию технологии изготовления деталей и узлов. В производстве и сборке выполняется обеспечение размерной точности. Пути достижения размерной точности определяются на этапе конструкторско-технологической подготовки производства [1,2,3]. Решение указанных задач на каждом из этапов может быть упрощено за счёт наличия математических моделей [4] и средств, позволяющих прогнозировать и определять действительное значение геометрических параметров [5,6], характеризующих достижимую точность.

Методика оценки вероятностных пространственных параметров сопряжений деталей должна позволять проводить оценку влияния геометрической точности поверхностей деталей на точность сопряжений и сборки деталей между собой. Разрабатываемая методика должна быть реализована в виде программной библиотеки. В работе предложена модель и программная реализация «виртуальной сборки» сборочных единиц сложных изделий, позволяющая

моделировать процесс сопряжения плоских и цилиндрических поверхностей деталей с размерами, характерными для деталей газотурбинных двигателей и производить расчет сборочных параметров.

2. Объект исследования

В качестве объекта исследований выступает сборка деталей диск и проставка турбины. Эскиз проставки и диска, содержащий контролируемые геометрические параметры, приведен на рисунке 1.

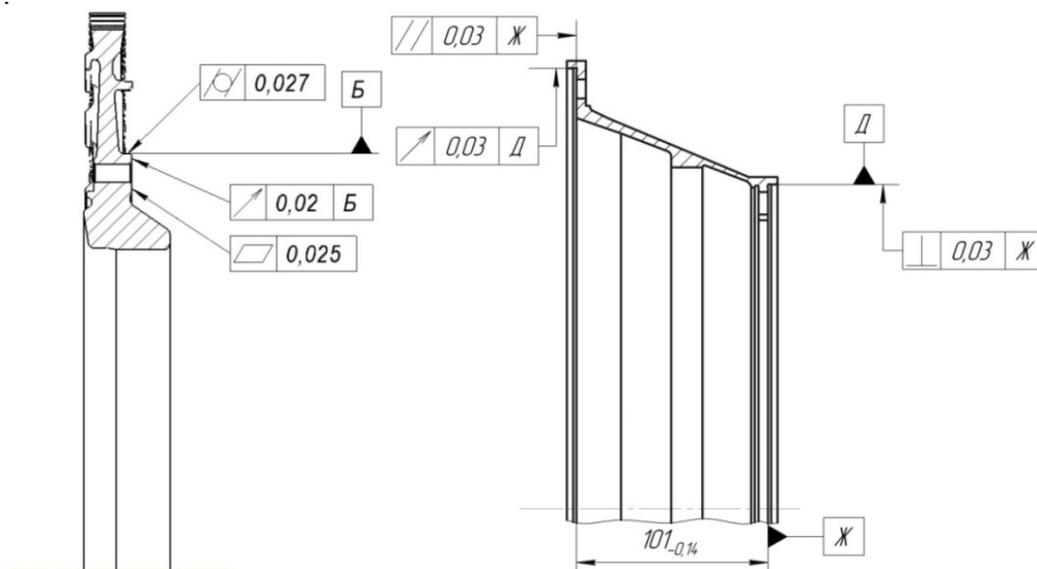


Рисунок 1. Эскиз детали «Диск».

Рисунок 2. Эскиз детали «Проставка».

На детали типа «проставка» контролируемыми геометрическими параметрами являются: линейный размер 101 с допуском $-0,14$ мм, перпендикулярность $0,03$ мм поверхности Д относительно Ж, параллельность $0,03$ мм торцевой сопрягаемой с диском поверхности относительно поверхности Ж и радиальное биение $0,03$ мм сопрягаемого с диском отверстия относительно поверхности Д. На диске имеется сопрягаемая с проставкой цилиндрическая поверхность Б и торец, биение которого не должно превышать $0,02$ мм. Помимо этого поверхности имеют нормирование по отклонению формы δ_ϕ (отклонение от цилиндричности и плоскостности) в пределах $0,03$ мм. Для расчета получаемых в результате сборочных параметров необходимо разработать математическую модель сборки деталей по поверхностям, имеющих геометрические отклонения. После сборки рассчитываются следующие сборочные параметры: радиальное биение диска относительно поверхности Д $\Delta_{\delta-\phi}$; параллельность торца диска Б относительно Ж $\Delta_{\text{пар-}\phi}$; концентричность диска относительно Д – $\Delta_{\text{кон}}$; отклонение осевого зазора $\Delta_{\text{ос}}$. Концентричность влияет на неравномерность торцевого зазора между лопатками диска и корпусом двигателя, который должен быть $0,3-0,5$ мм для всех ступеней. В этой связи удобнее оперировать радиус-вектором отклонения центра диска, поэтому координаты точки центра удобнее перевести в полярную систему координат $(\rho_{\text{сб-ц}}, \beta_{\text{сб-ц}})$.

3. Методика и алгоритмы виртуальной сборки

В общем виде контакт сопрягаемых соответственно пар поверхностей плоских и цилиндрических поверхностей происходит по конечному множеству точек. Такие задачи являются контактными [9]. Известны аналитические решения контактных задач поверхностей, не имеющих отклонения формы. В общем случае, для моделирования контактных задач поверхностей, имеющих отклонения формы, используется метод конечных элементов.

Названный метод позволяет учесть особенности геометрии поверхностей, решать задачи прогнозирования сборки, анализа допусков [10, 11], контактные и прочностные задачи [12].

Для моделирования сопряжений деталей разработана методика, включающая следующие этапы:

1. Создание действительных моделей деталей, формирование сборки. Действительные модели деталей представляют собой массивы точек их поверхностей.
2. Задание расчётной модели:
 - a. Построение триангуляционных сеток на поверхностях деталей.
 - b. Задание контактных пар поверхностей.
 - c. Задание ограничений на смещение деталей.
3. Выполнение расчёта, сохранение результатов.
4. Разработка модели обработки результатов расчёта, позволяющей определять сборочные геометрические параметры на основании координат конечно элементной (триангуляционной) сетки и матриц перемещений, деформаций и напряжений.
5. Расчёт статистических показателей.

Создание действительных моделей деталей осуществлялось в следующей последовательности. На первом этапе выполнялось построение номинальных моделей сопрягаемых деталей. На втором этапе рассчитывались действительные (модельные) сопрягаемые поверхности по конечному множеству точек на основе номинальных уравнений, функций отклонения формы и параметров отклонения расположения. Одним из методов формализации отклонений формы поверхностей является модальный подход [13].

Координату точки модельной измеряемой поверхности можно определить по формуле:

$$\vec{p}_p = (\vec{p}_n + \vec{n} \cdot \delta_\phi) \cdot \mathbf{R} + \vec{t}, \quad (1)$$

где \vec{p}_p , \vec{p}_n – вектор координат точек (x, y, z) соответственно измеряемой (моделируемой) и номинальной (CAD) поверхностей;

\vec{n} – вектор нормали в точке \vec{p}_n ;

δ_ϕ – величина отклонения формы в точке \vec{p}_n ;

\mathbf{R} , \vec{t} – матрица поворота и вектор транспонирования координат точки \vec{p}_n , характеризующие отклонение расположения.

В решаемой задаче, включающей диск и проставку, выполнено построение конечно-элементной сетки, у которой задавалась высокая плотность разбиения на контактирующих торцевых и цилиндрических поверхностях. Задавались параметры контакта у соединений: плоскость-плоскость (зазор G_2) и цилиндр-цилиндр (зазор G_1). Заданы условия ограничения шести степеней свободы у детали «Проставка». Для решения контактной задачи с использованием разработанной конечно-элементной модели, был разработан итерационный алгоритм, позволяющий рассчитать сопряжение деталей без учета деформаций деталей в процессе сборки, подробно описанный в [14]. Алгоритм нахождения сопряжённого состояния предполагает итерационное перемещение одной сопрягаемой поверхности относительно другой с вектором приложения усилия сборки поверхностей \vec{D}_1 . Введено понятие функции зазора $G(\vec{V})$, характеризующее достижение сопряжённого состояния поверхностей деталей и зависящее от вектора взаимного расположения поверхностей \vec{V} . Для расчёта функции $G(\vec{V})$ на каждом этапе выполняется наилучшее совмещение сопрягаемых поверхностей. Для выполнения процедуры наилучшего совмещения используется итерационный алгоритм ближайших точек (ICP) [15, 16]. Согласно данному алгоритму, на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль координатных осей. Для исключения пересечений двух поверхностей используется систему неравенств, представленную в работе [17], которая накладывает ограничения на функцию зазора $G(\vec{V})$. В результате работы алгоритма вычисляется матрица вращения и вектор

перемещения подвижной детали, определяющие преобразование ее начальной системы координат в систему координат в собранном состоянии:

$$\vec{p}_{cб} = \vec{p}_o \cdot \mathbf{R}_{cб} + \vec{t}_{cб}, \tag{2}$$

где $\vec{p}_{cб}$, \vec{p}_o – вектор координат точек (x, y, z) детали соответственно после сборки и в начальном состоянии;

$\mathbf{R}_{cб}$, $\vec{t}_{cб}$ – матрица поворота и вектор перемещения координат точки \vec{p}_o , характеризующие перемещение детали в процессе сборки.

Разработанные методика и итерационный алгоритм были использованы для расчета точности сопряжений сборочной единицы, включающей диск и проставку в турбине авиационного двигателя (рисунки 1 и 2). Рассматривается сопряжение названных деталей по поверхностям плоскость-цилиндр. Аналогичные соединения рассматривались в работе [18].

4. Результаты применения виртуальной сборки для прогноза сборочных параметров

Для оценки размерно-точных параметров сборки диска и проставки турбины (радиальное биение и параллельность торца диска) было выполнено моделирование 72 сопрягаемых поверхностей деталей, для каждой из которых производилось моделирование сборки в различных положениях (по 6 случаев для каждой поверхности за счет различного углового положения диска). Цилиндрические поверхности задавались по 720 равномерно распределенным точкам в сечении XOY в десяти сечениях, так же и плоские поверхности сопряжения задавались по 760 точкам в десяти сечениях. Сечения представляют собой радиус-вектор полярной системы представления поверхности, точки в сечениях – полярный угол. Величина амплитуды отклонения формы изменялась по нормальному закону распределения.

Предельные значения параметров геометрических погрешностей, используемых при моделировании измеряемых поверхностей, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Предельные значения параметров погрешностей в экспериментах.

Параметр	Д	Отверстие проставки	Ж	Торец проставки	Цилиндрическая поверхность диска	Торцевая плоскость диска
Измерительная погрешность				1,7(2,5)+L/333 [мкм]		
Отклонение от перпендикулярности	0,03 [мм]	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Отклонение от параллельности	Нет	Нет	База	0,03 [мм]	Нет	Нет
Отклонение размера	Нет	-0,06 [мм]	База	0,14 [мм]	Нет	Нет
Радиальное биение	База	0,03 [мм]	Нет	Нет	Нет	Нет
Торцевое биение	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	0,02 [мм]
Количество точек в поперечном сечении				720		
Количество точек в продольном сечении				10		

В соединении диска и проставки по условиям чертежа должен обеспечиваться натяг, не превышающий 0,09 мм. В этой связи диаметр отверстия проставки имеет допуск -0,06 мм, диаметр сопрягаемой цилиндрической поверхности диска до +0,03 мм.

Моделирование отклонений расположения производилось с использованием определений из ГОСТ Р 53442-2009 [19] посредством вращения и транспонирования (перемещения) точек плоскостей и цилиндрических поверхностей при помощи матриц вращения и вектора транспонирования из (1). При моделировании сборки диск принимал различные положения относительно проставки при помощи поворота вокруг оси вращения с шагом 60 градусов. Итерационный алгоритм сопряжения был реализован в программном пакете MATLAB.

Созданы модели поверхностей с учётом отклонений формы и расположения. В результате моделирования сопряжения определены положения диска относительно проставки, без учета деформаций деталей в процессе сборки. Предельное отклонение формы сопрягаемых поверхностей диска и проставки составляло 0,03 мм, предельная величина натяга в сопряжении отверстие проставки - цилиндрическая поверхность диска составила 0,08 мм.

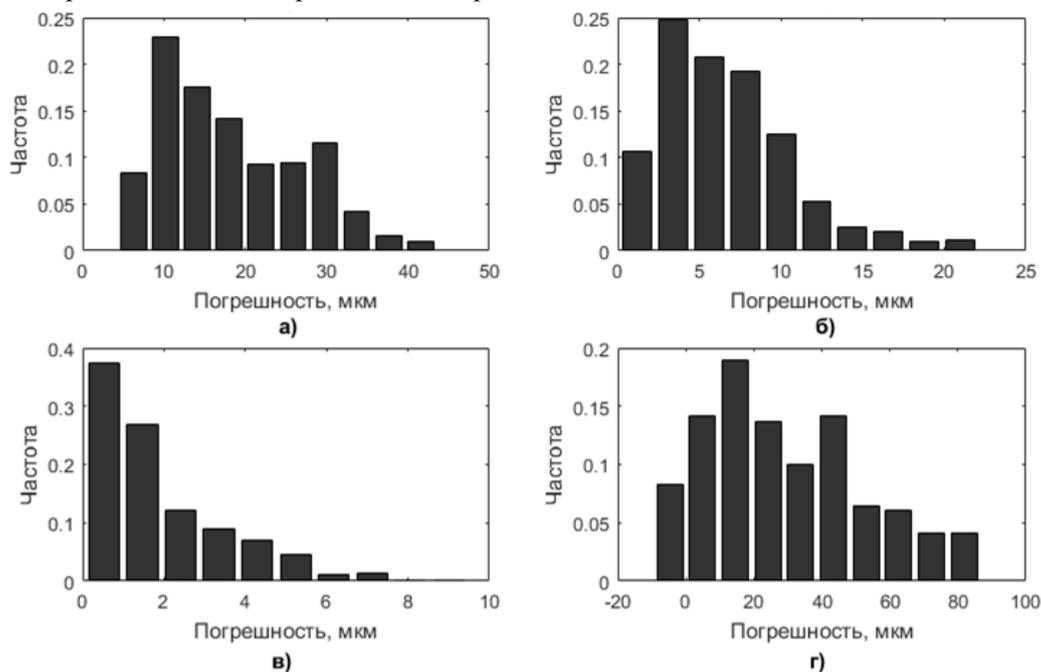


Рисунок 3. Гистограммы погрешностей сборочных параметров: Δ_{δ_d} (а); $\Delta_{нар_d}$ (б); $\rho_{сб_ц}$ (в); Δ_{oc} (г).

В таблице 2 приведены математическое ожидание μ , среднее квадратическое отклонение σ , минимальное и максимальное значение отклонений сборочных параметров с доверительной вероятностью 99,73%.

Таблица 2. Параметры отклонений формы и расположения сборки диск-проставка.

Параметр	μ , мкм	σ , мкм	Минимум, мкм	Максимум, мкм
Δ_{δ_d}	17,29	6,95	3,69	44,88
$\Delta_{нар_d}$	6,33	3,65	0,20	20,33
$\rho_{сб_ц}$	1,79	1,53	0,05	13,21
Δ_{oc}	29,71	23,87	-9,82	86,48

Рассмотрим степень влияния параметров отклонения формы (описываемое полиномиальными уравнениями со степенями λ_y для цилиндрических поверхностей и λ_m для торцевых) и величин натяга в сопряжении диска и проставки на погрешности сборочных параметров. Степень и характер влияние можно вычислить, используя коэффициенты корреляции между величинами неопределенностей и параметрами выполнения измерений. В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции между размерно-точностными параметрами деталей и параметрами сборки.

Параметры отклонения формы сопрягаемых поверхностей оказывают сильное влияние на величину радиального биения диска. Характер отклонения формы на торцах так же имеет среднюю величину корреляционной взаимосвязи с параметром и слабую связь с остальными параметрами. Как следует из результатов корреляционного анализа, величина достаточно

сильно взаимосвязана с отклонениями формы на сопрягаемых поверхностях, а значит может быть спрогнозирована по этим параметрам.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции для погрешностей сборочных параметров.

Параметр	Геометрические отклонения диска, мм			
	Δ_{σ}	$\Delta_{пар}$	$\Delta_{кон}$	$\Delta_{ос}$
Натяг G_2	0,02	-0,03	-0,07	0,00
Отклонение формы в цилиндре	0,75	-0,22	-0,03	-0,12
Отклонение формы торцев	0,67	-0,06	-0,08	-0,17
Степень полинома для цилиндров $\lambda_{ц}$	0,02	-0,24	-0,02	-0,04
Степень полинома для торцев $\lambda_{т}$	0,56	-0,22	-0,24	-0,19

Исходя из вышесказанного, для прогнозирования неопределенности измерения параметра Δ_{σ} можно использовать следующее регрессионное выражение:

$$\Delta_{\sigma} = f(G, \delta_{\phi}, \lambda), \tag{3}$$

Следующим этапом построения регрессионной модели стоит построить модель зависимостей неопределенностей от перечисленных параметров. Для решения поставленной задачи прогнозирования неопределенностей использовались радиальные базисные сети GRNN (Generalized Regression Neural Networks).

Была создана радиально-базисная нейронная сеть, имеющая 2 слоя – скрытого радиального базисного слоя, имеющего Q нейронов, и выходного линейного слоя, имеющего S нейронов. Схематично она представлена на рисунке 4. Радиально-базисный нейрон преобразовывает расстояние от данного входного вектора до соответствующего ему "центра" по некоторому нелинейному закону (функция Гаусса).

Число нейронов входного слоя P равно числу параметров, используемых для прогнозирования: величина натяга в соединении цилиндрических поверхностей; суммарная величина отклонения формы цилиндрических поверхностей; суммарная величина отклонения формы торцевых поверхностей; степень полинома, описывающего отклонение на цилиндрических поверхностях; степень полинома, описывающего отклонение на торцевых плоскостях. Число нейронов радиального базисного слоя Q равно числу элементов обучающего множества, то есть числу случаев сборки, используемых для обучения сети. Число нейронов второго, линейного слоя, равно числу прогнозируемых параметров. В нашем случае это параметр.

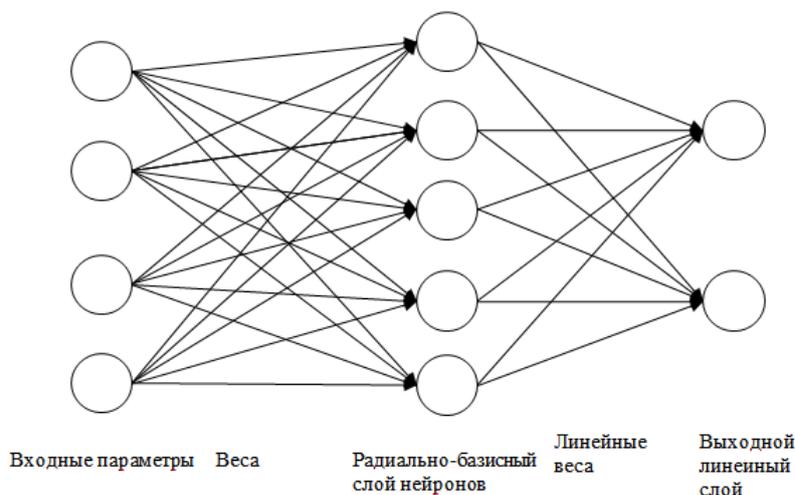


Рисунок 4. Архитектура радиальной базисной нейронной сети.

На основании результатов моделирования (таблицы 1 и 2, рисунок 3), в программном пакете MATLAB была создана и обучена радиальная базисная нейронная сеть. Для обучения сети использовалось 66 случаев сборки (в каждом случае было 6 возможных положений, поэтому результирующее значение выбиралось как среднее из этих 6 положений). Прогноз производился для оставшихся 6 случаев, в результате чего рассчитываются величины биения $\Delta_{\text{прогноз}}$. Производился расчет относительных погрешностей определения величин параметра «радиальное биение» $\Delta_{\text{отн}}$ по формуле:

$$\Delta_{\text{отн}} = (\Delta_{\text{прогноз}} - \Delta_{\text{б}}) / \Delta_{\text{б}} \cdot 100\% , \quad (4)$$

В таблице 4 приведены моментные характеристики (математическое ожидание μ ; среднеквадратическое отклонение σ), а так же минимальное и максимальное значения относительных погрешностей прогноза параметра $\Delta_{\text{б}}$.

Таблица 4. Статистические характеристики погрешности $\Delta_{\text{отн}}$.

Параметр	μ , %	σ , %	Минимум, %	Максимум, %
Обучение	0,00	0,00	0,00	0,00
Прогноз	-3,24	4,27	-9,08	2,77

Как следует из результатов, погрешности прогноза не превышает 10%.

5. Заключение

В работе приведена методика для прогнозирования точности сопряжения деталей на основе действительных геометрических моделей поверхностей. Рассмотрены результаты моделирования сопряжения деталей диск и проставка ротора турбины. Выполнен анализ степени влияния отклонений формы и размеров сопрягаемых поверхностей на сборочные параметры изделия. Данные, полученные с помощью моделирования, используются для создания и обучения радиально-базисной нейронной сети, позволяющие по набору параметров отклонения геометрии измеряемых поверхностей деталей прогнозировать погрешности сборочных параметров диска.

6. Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы повышения конкурентоспособности Самарского университета среди мировых ведущих научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

7. Литература

- [1] Soifer, V.A. Synthesis of a binary DOE focusing into an arbitrary curve, using the electromagnetic approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 237-247.
- [2] Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н.Л. Казанский, И.С. Степаненко, А.И. Хаймович, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т.40, №2. – С. 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.
- [3] Doskolovich, L.L. Calculation of diffraction optical elements for focusing in out-axis radial focal regions / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavel'ev, V.A. Sojfer // Avtometriya. – 1995. – Vol. 1. – P.114-119.
- [4] Deng, X. Research on the manufacturing of mechanical parts based on the theory of space symmetry group / X. Deng, J. Wang // Academic Journal of Manufacturing Engineering. – 2017. – Vol. 15(1). – P. 64-71.

- [5] Zakharov, O.V. Minimization of the systematic error in centerless measurement of the roundness of parts / O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 58(12). – P. 1317-1321.
- [6] Печенкин, М.В. К вопросу разработки методики измерения параметров зубчатых колес с гиперболоидной делительной поверхностью и назначения норм точности / М.В. Печенкин, А.Р. Абзалов, В.Э. Шустов // *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. – 2017 – Т. 20, № 2. – С. 87-90.
- [9] Kovalenko, P. Investigation of tribological properties of friction pairs duralumin – fluoropolymer used for design and manufacturing of biomechatronic devices / P. Kovalenko, S. Perepelkina, T. Korakhanov // *Tribology in Industry*. – 2017. – Vol. 39(2). – P. 192-197.
- [10] Anwer, N. From solid modelling to skin model shapes: shifting paradigms in computer-aided tolerancing / N. Anwer, B. Schleich, L. Mathieu, S. Wartzack // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 63. – P. 137-140.
- [11] Schleich, B. Status and Prospects of Skin Model Shapes for Geometric Variations Management / B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, S. Wartzack // *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*. *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 43. – P. 154-159.
- [12] Zubanov, V. Centrifugal kerosene pump CFD-modeling / V. Zubanov, L. Shabliy, A. Krivcov // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9(10). – P. 629-634.
- [13] Homri, L. Tolerance analysis – Form defects modeling and simulation by modal decomposition and optimization / L. Homri, E. Goka, G. Lvasseur, J. -Y. Dantan // *Computer-Aided Design*. – 2017. – Vol. 91. – P. 46-59.
- [14] Болотов, М.А. Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей / М.А. Болотов, В.А. Печенин, С.П. Мурзин // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 360-369. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-360-369.
- [15] Besl, P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1992. – Vol. 14(2). – P. 239-256.
- [16] Tian, H. ICP registration technology based on the coordinate system direction fit / H. Tian, P. Yang, C. Su, Z. Dong // *International Journal of Security and its Applications*. – Vol. 9(12). – P. 47-56.
- [17] Pierce, R.S. Simulation of mating between nonanalytical programming formulation / R.S. Pierce, D. Rosen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2007. – Vol. 7(4). – P. 314-321.
- [18] Schleich, B. Approaches for the assembly simulation of skin model shapes / B. Schleich, S. Wartzack // *Computer-Aided Design*. – 2015. – Vol. 65. – P. 18-33.
- [19] ГОСТ Р 53442-2009. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – Введ. 2012-01-01. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ. – 2010. – 51 с.

Prediction of the geometric parameters of products assemblies using neural network models

M.A. Bolotov¹, V.A. Pechenin¹, N.V. Rusanov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The use of predictive models of technological processes for the assembly of critical products will allow for the adaptive management of the assembly based on the measured information. Direct simulation of the conjugation process using numerical models of interfaces and finite element models of assemblies requires significant computational resources and is often accompanied by convergence problems of solutions. To solve these problems, it is possible to use neural network models describing the main regularities of the conjugation process on the basis of accumulated results. In this paper, a technique is given for predicting the accuracy of the interface of parts on the basis of real geometric models of surfaces. The actual parts models are arrays of points on their surfaces. The methodology uses the developed model, which allows to calculate the assembly geometric parameters of parts. The results of modeling the mating of disk and spacer of the turbine rotor are considered. To predict the parameters of radial runout of the disk in the assembly, depending on the magnitude and nature of the form deviation and the magnitude of the gap of the interfaced surfaces, a radial-basic neural network was created and trained.

Keywords: mating, accuracy, actual geometry, skin model shapes, radial runout, end runout, gap, radial-basic neural, network, training, prediction.