Конкурсная работа на соискание премии «Авиастроитель года» по итогам 2017 года

ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО: CAD/CAM СИСТЕМЫ, OMW-ТЕХНОЛОГИИ И НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

ЧИГРИНЕЦ Е.Г., канд. техн. наук, руководитель группы
МЕРКУЛОВ М.А., ведущий специалист

Ростовский вертолетный производственный комплекс Публичное акционерное общество «Роствертол» имени Б.Н. Слюсаря

Развитие вычислительной техники в конце двадцатого века вызвало бурное внедрение информационных технологий во всех сферах экономики, что вначале 2000-х привело к качественному скачку и выходу на новый уровень производственных процессов с широким применением цифровых технологий. 2011 год связывают с началом четвертой промышленной революции – применение цифровых технологий на всех этапах технологического процесса. Инициатива получила название «Индустрия 4.0», суть которой заключается в автоматизации всех процессов и этапов производства: начиная от цифрового проектирования и управления жизненным циклом изделия и заканчивая массовой кастомизацией, применением искусственного интеллекта и созданием автоматических цехов и заводов.

Рост глобальной конкуренции и высокие требования к производимым товарам и услугам обозначили направления диджитилизации экономики Российской Федерации. Значительное влияние на темпы перехода страны на инновационные рельсы развития оказывает авиационная промышленность как одна из наиболее наукоемких отраслей, играющих системообразующую роль. Кроме того, авиастроение является важнейшим элементом обеспечения интересов РФ в оборонной и военно-политической сфере, а также важным фактором поддержания суверенитета страны.

Снижение издержек производства, повышение качества, технических характеристик и конкурентоспособности летательного аппарата (ЛА) возможно двумя путями: совершенствованием конструкции всего изделия и его отдельных узлов, а также оптимизацией производственного процесса и применением прогрессивных технологий изготовления.

ПАО «Роствертол» является серийным предприятием, занимающемся выпуском вертолетов семейства «Ми» (Ми-24, Ми-26, Ми-28, Ми-35), поэтому была поставлена стратегическая задача по совершенствованию технологических цепочек на всех уровнях с широким внедрением в производство цифровых технологий. Для выполнения задач, обозначенных в Государственной программе «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы», предприятием выполнено техническое перевооружение механообрабатывающего производства: полностью обновлен парк станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на многоцелевые 4-х и 5-ти координатные обрабатывающие центры (ОЦ); созданы высокопроизводительные рабочие места инженерного состава с широким внедрением CAD/CAM систем высшего уровня, ведется активный переход на электронный макет изделия взамен плазово-шаблонного метода увязки деталей вертолета, системы PLM/PDM/ERP интегрируются в бизнес-процессы предприятия.

Руководствуясь государственной программой «Цифровая экономика Российской Федерации» (распоряжение Правительства №1632-р от 28.02.2017), где одними из основных сквозных цифровых технологий отмечены «новые производственные технологии» и «нейротехнологии и искусственный интеллект», выполнен анализ производственных проблем изготовления вертолетной техники на предприятии, тормозящих рост производительности труда и снижающих качество готовой продукции. Поставлены задачи, которые могут быть решены внедрением в производство элементов искусственного интеллекта на базе нейросетей и применением перспективных технологий в подготовке производства деталей вертолетной техники. Выполненное исследование носит научно-прикладной характер и может быть использовано для решения инженерных задач в ходе конструкторско-технологической

подготовке производства деталей авиационных конструкций не только в рамках ПАО «Роствертол» и АО «Вертолеты России», но и всех предприятий отрасли.

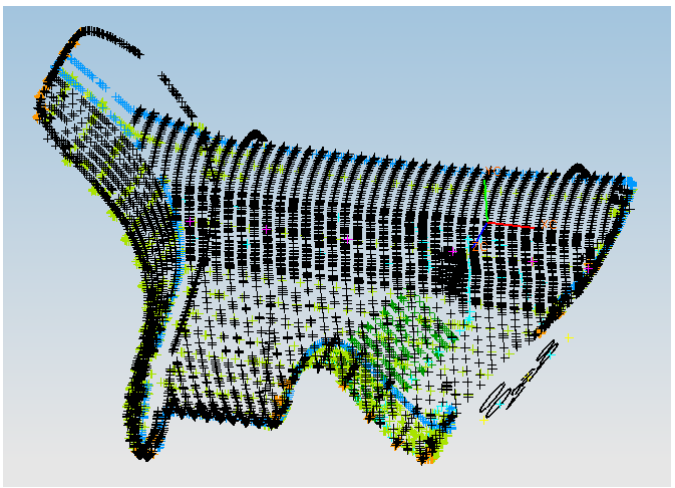
Применение CAD систем в конструкторско-технологической подготовке производства деталей авиационных конструкций

Существует постоянная взаимосвязь между конструкцией летательного аппарата и технологией его изготовления. При конструировании ввиду высоких требований к надежности изделия руководствуются условием максимальной прочности при минимальной массе. В результате большинство деталей вертолета имеют сложную форму и небольшую жесткость. Так как окончательная жесткость конструкции достигается только в результате сборки изделия, значительное внимание уделяется технологической подготовке процесса механической обработки деталей малой жесткости и сложной формы.

Значительная часть изделий авиастроения изготавливается плазово-шаблонным методом. В настоящее время возникает острая потребность перехода с физической модели изделия (макета, плаза) на математические, которые пригодны для реализации технологических процессов формообразования на оборудовании с числовым программным управлением.

Одним из примеров таких деталей является стойка пылезащтного устройства (ПЗУ) вертолета (рис.1,а). Рассматриваемая деталь имеет сложную нелинейную геометрию, предопределяющую выбор станков с ЧПУ для ее формообразования. Формирование программы для станков с ЧПУ в CAM модуле требует создания трехмерной модели в используемой предприятием CAD системе. Для снятия геометрической информации с физической модели детали использовалась контрольно-измерительная машина (КИМ) Global Image 3d. Результаты обмера представлены на рис. 1,б.

а)



б)

Рис. 1 Стойка ПЗУ: а) физическая модель; б) результаты снятия геометрической информации с физической модели

В ходе анализа снятой геометрической информации с физической модели было выявлено, что значительное количество замеров получено с погрешностями. По этой причине построение математической модели основывалось на идентификации функциональной модели для каждого сечения после исключения выбросов.

В качестве аппроксимирующей функции выбиралась полиномиальная модель для каждого сечения Z:

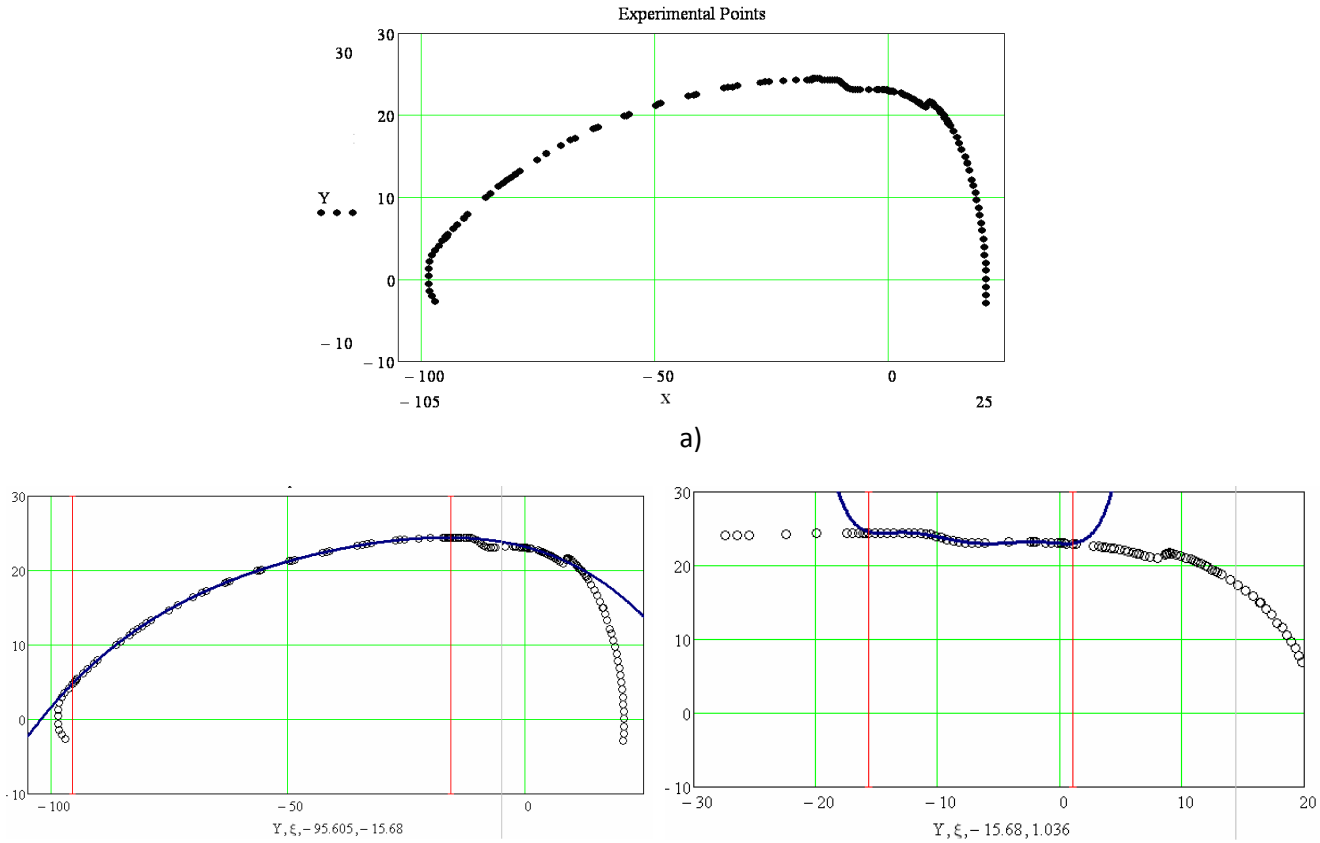
$$Y(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot x^{i-1}.$$

Для сложных сечений модель идентифицировалась на нескольких интервалах и записывалась в виде:

$$Y(x)=\begin{cases}\sum_{i=1}^{n} a_i \cdot x^{i-1} & x_0 \le x \le x_1 \\ \sum_{j=1}^{n} b_j \cdot x^{j-1} & x_1 \le x \le x_2 \\ \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot x^{k-1} & x_2 \le x \le x_3 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\end{cases},$$

для каждого сечения Z=constant.

В качестве критерия оценки точности идентифицированных моделей использовалась норма Гаусса.



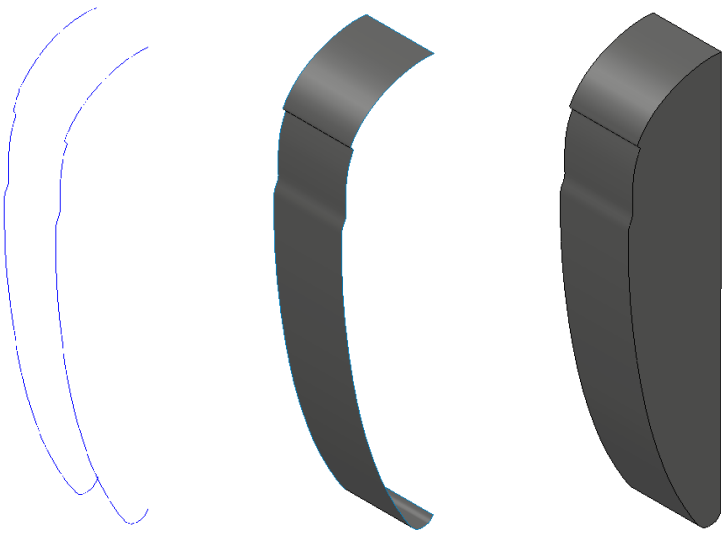
а)

б) в)

Рис. 2 Пример моделирования сечения: а) экспериментальные точки; б) эмпирическая функциональная модель для интервала -95.6<x<-15.68; в) эмпирическая функциональная модель для интервала -15.68<x<1.03

В дальнейшем полученные модели подготавливались для сшивания – задавались уравнения касательных на граничных точках интервала аппроксимации (рис. 3).

Полученные модели использовались для создания 3-d моделей в различных CAD системах, возможности которых позволяют задавать функциональные модели напрямую (параметрически) или через инструменты сплайновой геометрии.



а) б) в)

Рис. 3 Пример создания 3-d модели фрагмента детали по двум сечениям: а) геометрия сечений; б) формирование оболочки по сечениям; в) формирование твердотельной модели

Применение CAM систем и концепции OMV измерений с целью реализации технологии адаптивной механической обработки особо ответственной детали вертолета

Большинство деталей ЛА имеют сложную пространственную геометрию с высокими требованиями к взаимному расположению механически обрабатываемых элементов. В связи с этим в авиационном производстве большое внимание уделяется разработке управляющих программ (УП) для 4-х и 5-ти координатных обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ). УП формируются в CAM системе по твердотельным трехмерным моделям с учетом сложной геометрии обрабатываемых поверхностей, обуславливающую особенность базирования, закрепления детали и конструкции оснастки, а формирование траектории движения инструмента выполняется с учетом стратегии обработки отдельных поверхностей, зон малой жесткости деталей и зон обхода инструмента.

Изменение в области координатно-измерительного оборудования, которое непосредственно затрагивает производственный процесс и механическую обработку в частности, связано с появлением измерительных головок, устанавливаемых в шпиндель ОЦ вместо режущего инструмента. Это привело к бурному развитию технологий OMV (от англ. on-machine verification) – контролю точности обработанной детали непосредственно на станке. Использование CAM систем совместно с OMV измерениями открывает широкие возможности для практической реализации технологии виртуального базирования, когда в стойку ЧПУ вносятся угловые и линейные поправки, учитывающие фактическое положение литейной (и/или кованой) заготовки, не имеющей явных технологических баз, с целью обеспечения равномерности распределения припуска на обработку и минимизации брака. Как результат, формируемые управляющие программы обладают свойством «адаптивности» – траектории инструмента рассчитываются с учетом фактической формы и положения обрабатываемой заготовки на каждом конкретном установе.

Авторами программно реализован процесс адаптивной лезвийной обработки с применением виртуального базирования особо ответственной детали вертолета «Корпус рукоятки», изготавливаемой из труднообрабатываемой стали ВНЛ-3. Главной проблемой серийного внедрения детали является отсутствие явных технологических баз, обеспечивающих повторяемость и качественное изготовление деталей. Кроме того, литейные заготовки имеют значительный разброс величин припусков на механическую обработку даже в рамках одной

партии. Установив деталь в приспособление и определив нулевую точку O_0 (X_0 Y_0 Z_0) управляющей программы, на второй и последующих заготовках партии ноль детали (O_1) будет иметь совершенно другие координаты (X_1 Y_1 Z_1) (рис. 4).

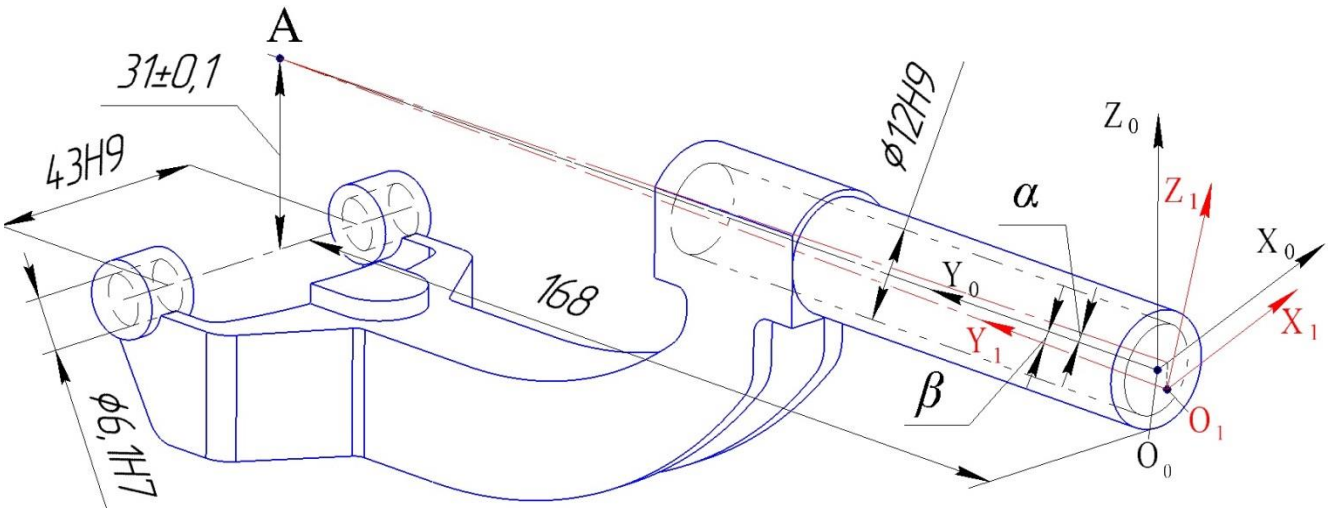


Рис. 4 Ноль детали «Корпус рукоятки»: O_0 – теоретическое положение, O_1 – реальное положение

Неверное расположение заготовки относительно нулевой точки в процессе механообработки приводит к неисправимому браку – смещению обработанных поверхностей относительно необрабатываемых на величину, превышающей допуск (рис. 5).

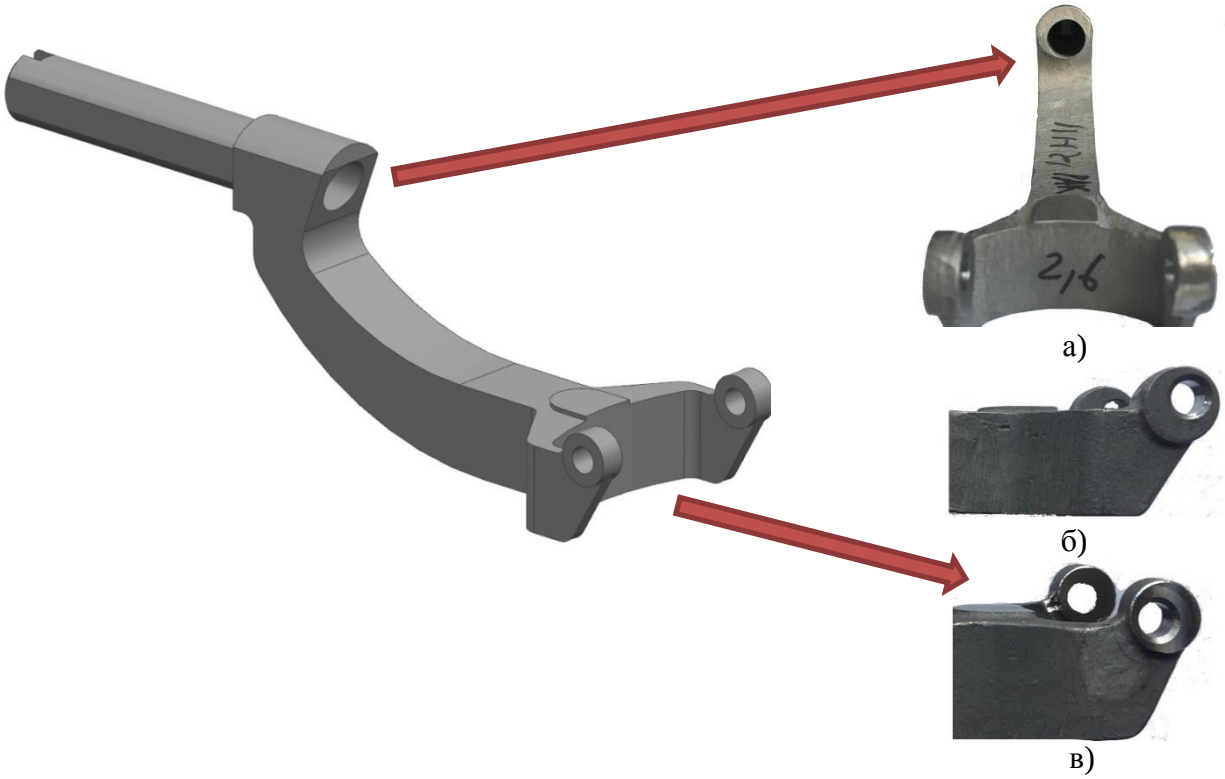


Рис. 5 Дефекты механической обработки детали «Корпус рукоятки»: а – смещение отверстия Ø12H9, б – смещение отверстия Ø6,1H7 в прямом направлении, в – смещение отверстия Ø6,1H7 в обратном направлении

Для преодоления возникших трудностей было принято решение использовать виртуальное базирование данной заготовки, т.е. внесение поправок в нулевую точку

управляющей программы механической обработки под конкретное положение заготовки. Геометрически поставленная задача может быть решена проецированием нулевой точки O_1 (см рис. 4) на плоскости YZ (точка O_1^*) и XY (точка O_1^{**}) с последующем определением угловых поправок (α, β) относительно теоретически необходимого положения (рис. 6).

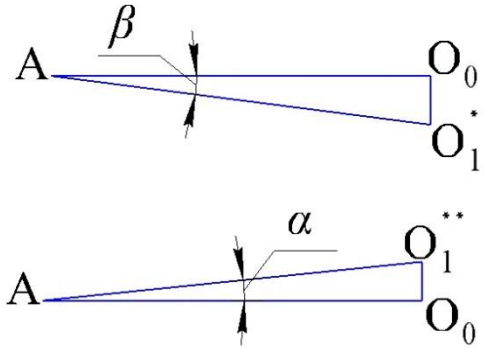


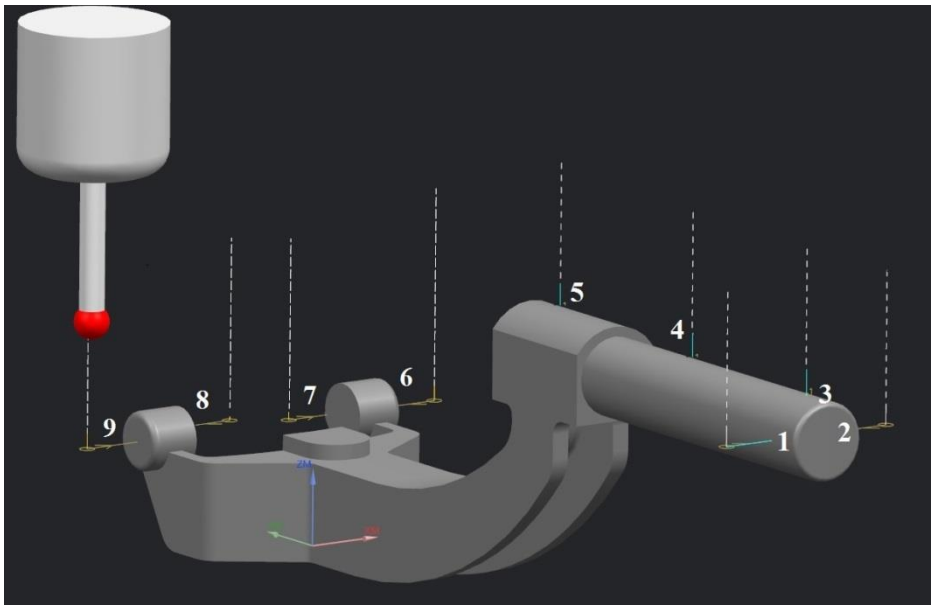
Рис. 6 Определение угловых поправок нулевой точки O_1 относительно теоретической точки O_0: AO_0 – теоретическая ось детали, AO_1^* – проекция AO_0 на плоскость YZ, , AO_1^{**} – проекция AO_0 на плоскость XY, α – угловая поправка координаты X, β – угловая поправка координаты Y

Значения углов могут быть вычислены по формулам:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{O_0O_1^{**}}{AO_0}\right);$$

$$\beta = \mathrm{arctg}\left(\frac{O_0O_1^{*}}{AO_0}\right)$$

Для определения угловых поправок методом параметрического программирования разработана подпрограмма измерения, с помощью которой выполнялся обмер заготовки в контрольных точках с последующим пересчетом ее положения относительно теоретически необходимого по представленным выше формулам. Координаты контрольных точек определены измерительным датчиком Renishaw, которым оснащен обрабатывающий центр. Элемент подпрограммы измерения, реализуемой на ОЦ, представлен на рис. 5.



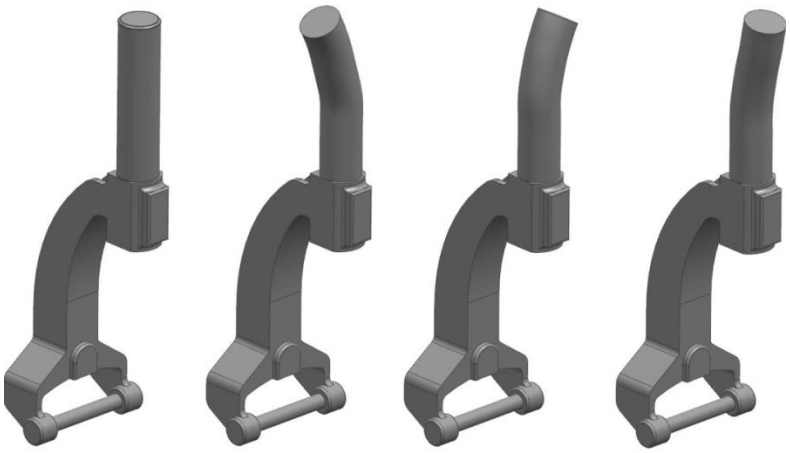

```
#503=ATAN[[#116-9-52.5]/168]
Z150 F5000
#500=[#110+#111]/2
#2802=#2801+#503
X-37 Y18 F5000
Z19.5 F1000
G31 X-22 F100 M26
#113 = #5061
G1 X-37 F1000
Z100 F5000
X37
Z19.5 F1000
G31 X22 F100 M26
#114 = #5061
G1 X37 F1000
Z100 F5000
#501=[#113+#114]/2
#504=#501-#500
#522=#2601-#711
#523=#2701-#600-#712
#2702=#523*COS#503+#522*SIN#503+
#712+#600
#2602=#522*COS#503-
#523*SIN#503+#711
```

а) б)

Рис. 5 Определение реального положения заготовки в приспособлении: а) элемент траектории движения измерительного датчика, б) элемент программного кода движения датчика и пересчета положения заготовки

Еще одним несомненным достоинством OMW-технологий является не только осуществление процедуры виртуального базирования, но и возможность перераспределения припуска литейных и/или штампованных деталей для обеспечения «вписываемости»

механической обработки в заготовку, изготовленную вне предела допуска. Поясним это на примере ранее рассмотренной детали «Корпус рукоятки». Так часть заготовок данных деталей имеют искривленную цилиндрическую часть (рис. 6).



а) б) в) г)

Рис. 6 Заготовка детали «Корпус рукоятки»: а – идеальная заготовка; б,в,г – варианты искривления цилиндрической части в одной или двух плоскостях **(величина кривизны показана условно для большей наглядности)**

Величина кривизны делает невозможным получение годных деталей даже с применением процедуры виртуального базирования. С другой стороны, искривление рукоятки проблематично определить визуально или с помощью стандартных средств измерения, а применения стационарных КИМ для обмера всей партии заготовок по производственным причинам и, учитывая большие объемы партий, не представляется возможным. Поэтому данный дефект выявляется уже на заключительных операциях механической обработки, когда поправки в нулевую точку внесены, а на детали имеются недообработанные места (рис. 7). Это ведет к увеличению процента бракованных деталей, снижению производительности труда, росту технологических издержек производства, что негативно сказывается на конкурентоспособности готовой продукции.

Рис. 7 Недообработанный участок на чистовой поверхности

С учетом этого в код подпрограммы измерения заложены функции, команды и условные операторы, которые по результатам обмера заготовки вносят такие поправки в нулевую точку, которые перераспределяют припуск на механическую обработку с учетом кривизны цилиндрической части «корпуса рукоятки». Другими словами мы смещаем припуск в сторону возможного образования «черных» мест на обработанных поверхностях (см. рис.7). В случае больших значений искривлений (припуска недостаточно для его исправления) на стойку ЧПУ выводится предупреждение, что обрабатывать данную деталь не нужно.

Процесс разработки подпрограмм OMW-измерений и операций адаптивной механической обработки достаточно сложен, уникален для каждой конкретной детали и требует глубоких знаний в области параметрического программирования, однако окупает все трудозатраты уже в рамках изготовления первой партии деталей. Так разработанный авторами технологический процесс механической обработки детали «корпус рукоятки» позволил снизить количество брака на 90%, а расход режущего инструмента на 40%.

Применение элементов искусственного интеллекта в технологической подготовке производства деталей из полимерных композиционных материалов

Актуальным направлением развития научно-технического прогресса в авиастроении является применение новых материалов, таких как полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных и стеклянных волокон – углепластики и стеклопластики, которые наряду с повышением прочности и коррозионной стойкости изделия, позволяют добиться существенного снижения массы летательного аппарата.

Большое число особо ответственных авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов подвергается механической обработке, в частности, для получения крепежных отверстий, обеспечивающих крепление композитной конструкции (лопасти несущих и рулевых винтов, стабилизаторы, крылья и т.п.). Эти конструкции называются в авиации особо ответственными, что означает просто исключительную важность в обеспечении надежности и живучести летательного аппарата. В такие крепежные отверстия запрессовывается стальная втулка, предварительно охлаждаемая до углекислотных температур, причем требования к надежности ее установки очень жесткие. Обеспечение их возможно за счет высокой точности отверстия, малых высотных параметров шероховатости, отсутствия расслоений и локального ослабления механических свойств связующего. Наиболее опасные и часто встречаемые дефекты механообработки – расслоения, которые возникают в местах входа/выхода инструмента и снижают усталостную долговечность, прочность, эксплуатационную надежность изделия и интенсифицируют влагопоглощение.

Результатом серии опытов по определению зависимости размеров дефектов отверстий – расслоений от режимов обработки стали матрицы данных (1), которые для удобства последующего использования необходимо было преобразовать в эмпирические модели, обеспечивающие возможность предсказания дефектов и выбора рациональных режимов. Традиционно для этих целей используются регрессионные одно-, двух- и многофакторные модели первого или второго порядка (авторы использовали градиентные методы нелинейной оптимизации). Однако, дискретность свойств ПКМ приводит к значительному разбросу размеров дефектов и их доверительных интервалов, получаемых в результате статистической обработки даже многократного повторения экспериментов. Эти зависимости качественно правильно отражают характер изменения размеров расслоений от режимов обработки, однако, не позволяют описать тонкие, но практически важные количественные особенности зависимостей размеров дефекта от режимов процесса при использовании инструментов с различной геометрией.

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} & x_{28} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} & x_{n6} & x_{n7} & x_{n8} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

где x_{n1} - столбец скоростей резания, м/мин; x_{n2} - столбец подач, мм/об; x_{n3} - столбец значений расслоений на входе отверстия для сверла тип 1, мм; x_{n4} - столбец значений расслоений на выходе отверстия для сверла тип 2, мм; x_{n5} - столбец значений расслоений на входе отверстия для сверла тип 2, мм; x_{n6} - столбец значений расслоений на выходе отверстия для сверла тип 2, мм; x_{n7} - столбец значений расслоений на входе отверстия для сверла тип 3, мм; x_{n8} - столбец значений расслоений на выходе отверстия для сверла тип 3, мм.

Для преодоления обозначенных выше проблем исследована возможность разработки и обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) в качестве моделей, обеспечивающих адекватный прогноз качества процессов сверления высоконагруженных авиационных конструкций из ПКМ.

Искусственные нейронные сети представляют собой набор математических и алгоритмических методов, созданных для моделирования функций мозга, и, подобно ему, имеют многослойную иерархическую структуру и способность к обучению.

Основным блоком ИНС является формальный или искусственный нейрон (он же узел сети), представляющий собой или математическую, или алгоритмическую, или программно реализованную модель, чьи элементы являются прямыми аналогами компонент биологического нейрона.

На каждый вход нейрона подается сигнал x_i, при этом с каждым входом связан синаптический вес w_i. В теле нейрона с помощью взвешенного сумматора (2) вычисляется функция отклика (3), т.е. реализуется нелинейное отображение многомерного пространства входов R^n в скалярный выход R^1.

$$NET = \sum_{i=0}^{n} w_i x_i \tag{2}$$

$$OUT = F(NET - \theta), \tag{3}$$

где x_i – входные сигналы, совокупность которых образует вектор x; w_i – весовые коэффициенты, совокупность которых образует вектор весов w; NET – взвешенная сумма весов, значение которой передается на нелинейный элемент; θ – пороговый уровень данного нейрона; F – нелинейная функция активации; OUT – выходной сигнал.

В данном исследовании в разработке нейронной сети применялась сигмоидная функция активации в виде гиперболического тангенса (4).

$$OUT = th(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}} \tag{4}$$

Процедура, с помощью которой происходит настройка ИНС, называется алгоритмом обучения. В процессе обучения происходит адаптация синаптических весов и топологии нейронной сети так, чтобы выходные сигналы отвечали некоторому заранее заданному критерию качества. Обучение ИНС обладает свойством адаптивности, которое обеспечивает настройку весов в соответствии с характеристиками окружающей среды. Т.е. с изменением входных сигналов сеть в реальном времени «переучивается» применительно к новым условиям. Таким образом, ИНС можно рассматривать как черный ящик, который реализует отображение *n*-мерного вектора $x = (x_1, x_2, ... x_n)^T$ в *m*-мерный вектор $y = (y_1, y_2, ... y_n)^T$.

Так как в случае нейронной сети, моделирующей размеры дефектов в зависимости от режимов обработки, известны как входные сигналы – скорость резания и подача, так и выходные – величина расслоений, то в работе использовался алгоритм обучения с учителем методом обратного распространения ошибки (рис. 8). В процессе обучения сеть меняет свои параметры и учится давать нужное отображение $x \to y$. Это означает, что должно быть задано множество пар векторов $\left\{x^s, d^s\right\}$, $s = 1...S$, где $\left\{x^s\right\} = \left\{x^1, ..., x^S\right\}$ - формализованное условие задачи, $\left\{d^s\right\} = \left\{d^1, ..., d^S\right\}$ - известное решение для этого условия. Совокупность пар $\left\{x^s, d^s\right\}$ составляет обучающее множество. Необходимо учитывать, что количество элементов S в обучающем множестве должно быть достаточным для обучения сети, но строго не регламентируется. Перед построением нейронных сетей необходимо сформировать обучающие наборы. В качестве файла экспериментальных данных будем использовать матрицу (1), сформированную ранее.

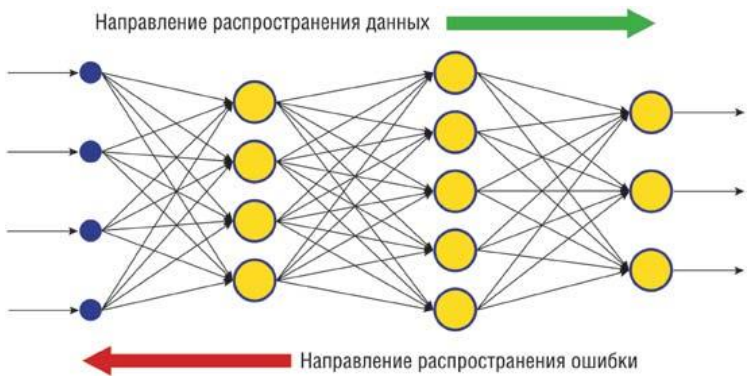


Рис. 8 Алгоритм обратного распространения ошибки

Для повышения обучаемости будущих сетей и получения более точных результатов проведем виртуальные эксперименты в среде Mathcad. Виртуальные эксперименты представляют собой размножение экспериментальных данных при каждом наборе скоростей резания и подач внутри доверительных интервалов, определенных по результатам опытов.

Формирование обучающих наборов завершается выдачей двух переменных *Input* и *Output* в виде текстовых файлов. Переменная *Input* представляет собой наборы режимов обработки (скорость резания и подача), а *Output* соответствующие им значения расслоений.

Построение нейронных сетей выполнялось с помощью инструмента *Neural Network Fitting Tool* среды MATLAB. После ввода входных данных в рабочее поле проведем перераспределение всего обучающего набора на три случайно выбираемых подмножества данных:

1. Обучение, составляющего 70% данных всего обучающего набора.
2. Проверка валидности – 15% обучающего набора.
3. Тестирование качества аппроксимации – 15% обучающего набора.

Затем необходимо согласовать структуру сети. В выходном слое аппроксимации функции всегда один слой. Число нейронов во входном слое подбирается опытным путем и в нашем случае изменяется от 3 до 5. Критерий выбора – наиболее простая сеть, но адекватно описывающая процесс. После согласования структуры запускаем обучение сети, после которого можем ознакомиться с результатами в виде гистограмм ошибок (рис. 9) и регрессионных линий (рис. 10).

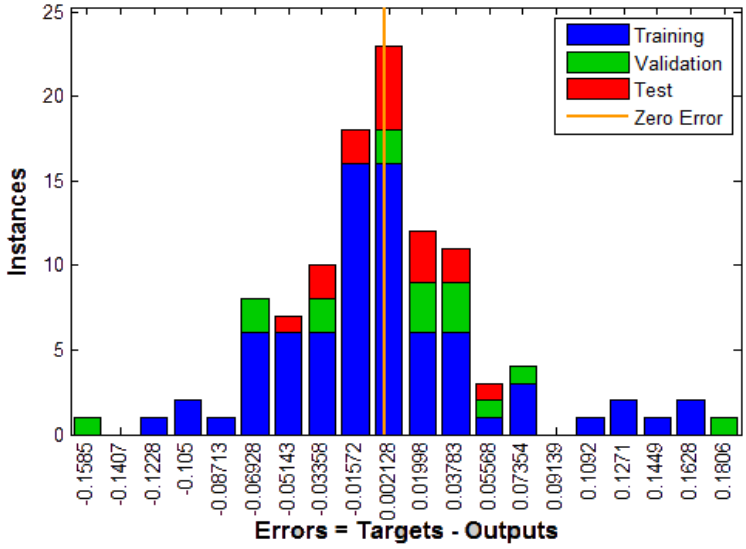


Рис. 8 Гистограммы ошибок

На рис. 9 по горизонтали представлены отклонения загруженных данных от результатов предсказания нейронной сетью, по вертикали – количество отклонений. Из рис. 10 значение коэффициента регрессии R превышает 0,97 (при приемлемом значении 0,9). Это означает, что более 97% предсказанных нейронной сетью результатов на этапах тренировки, валидации и тестирования совпадают со значениями обучающих данных и полученная сеть обладает достаточной точностью.

Далее для исследования работы создаваемых сетей используем Simulink модель-шаблон, которая генерирует массив нормально распределенных подач и скоростей резания, подавая их на вход сети. На выход нейронной сети подаются соответствующие режимам обработки значения расслоений. Симуляция оканчивается созданием точечной трехмерной диаграммы.

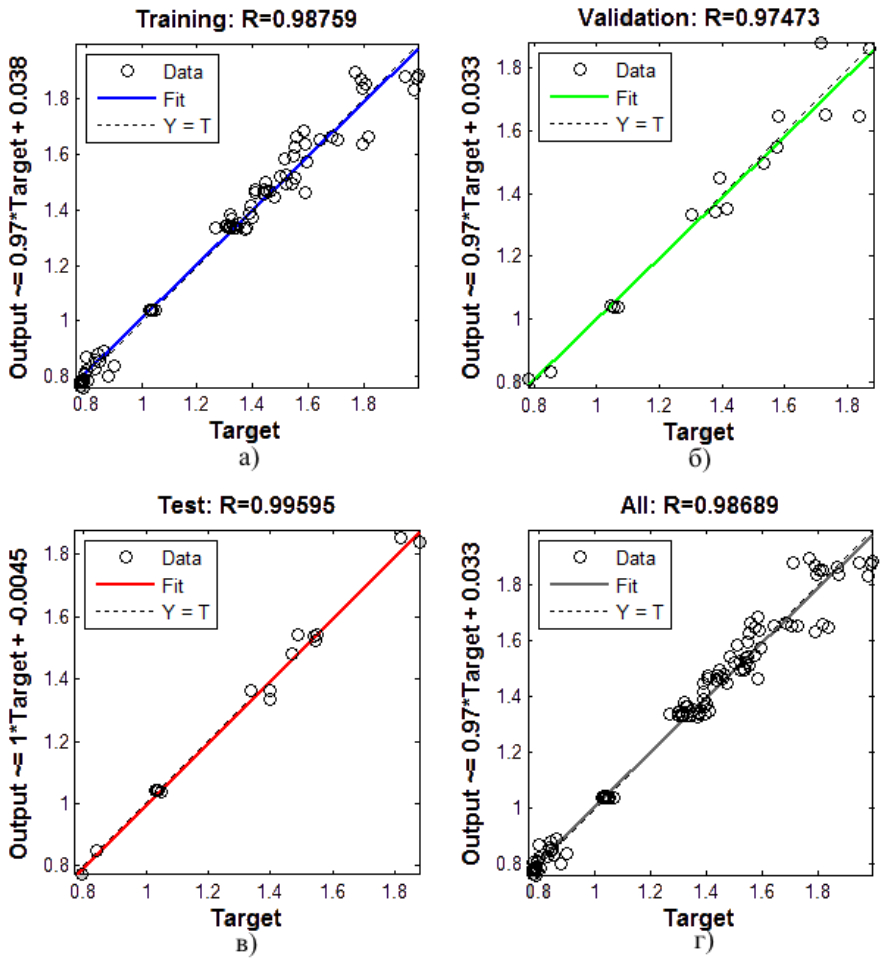


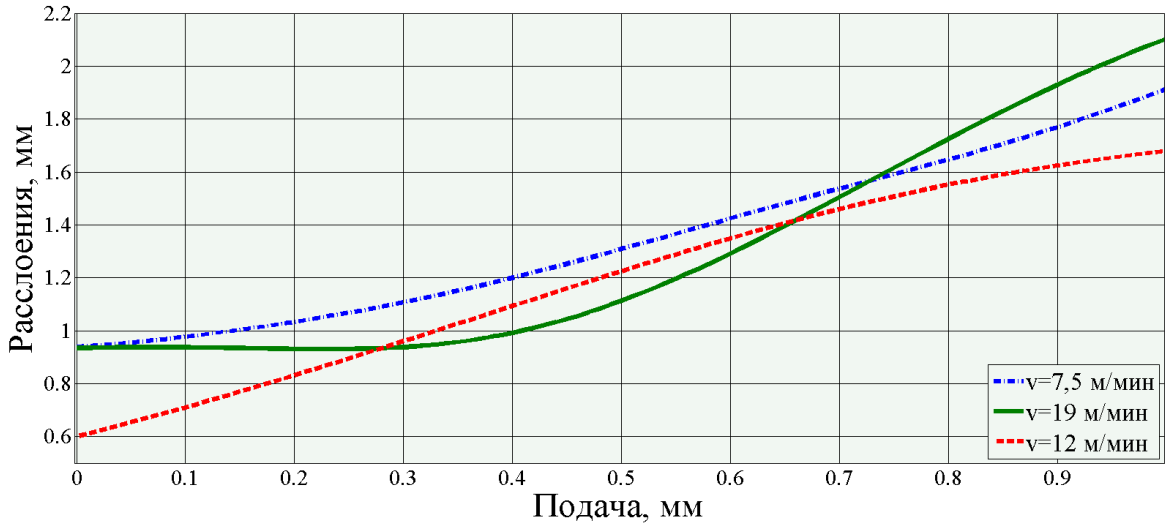
Рис. 10 Графики рассеяния обучающих данных от предсказаний нейронной сети на стадиях: а) тренировки, б) валидации, в) тестирования, в) всех данных

После того как ИНС научилась давать уже известные результаты, за счет способности к обобщению сетью могут быть получены новые результаты, если на вход подать вектор, который не встречался при обучении. Так реализуется возможность нейронной сети предсказывать результаты экспериментов.

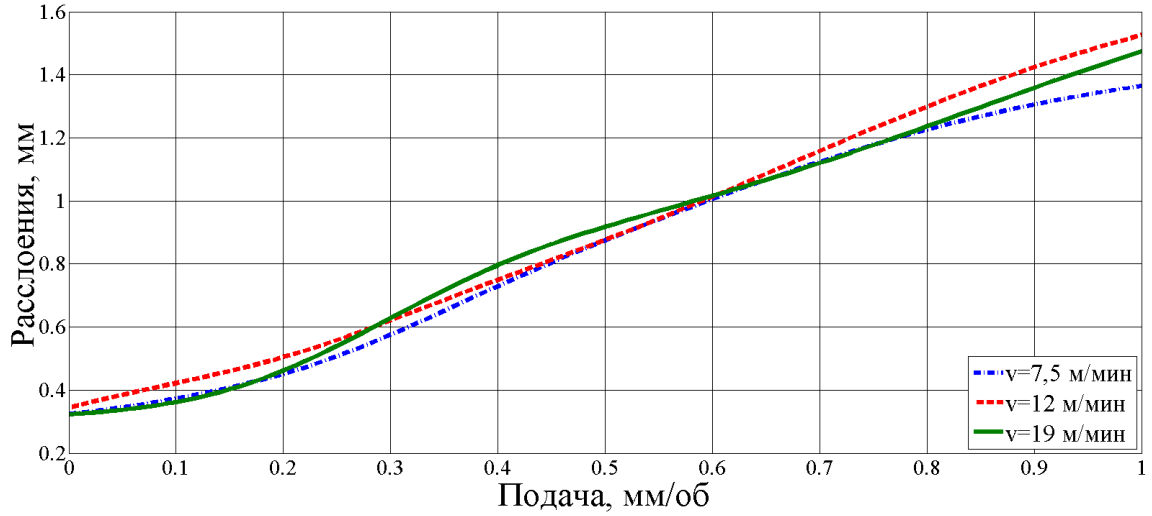
Изобразительные и прогнозные свойства разработанной архитектуры нейронной сети были исследованы при обработке серии экспериментов по исследованию качества получаемых отверстий в зависимости от скорости резания и подачи, а также сопоставлены с результатами, полученными методом сопряженных градиентов.

На рис. 11 представлены отклики нейронных сетей расслоений на входе в отверстие, зависящих от подачи при постоянной скорости резания. Для сравнения из двухфакторных моделей, полученных методом сопряженных градиентов, были выделены линейные однофакторные зависимости размеров дефектов от подачи при постоянной скорости резания (рис. 12).

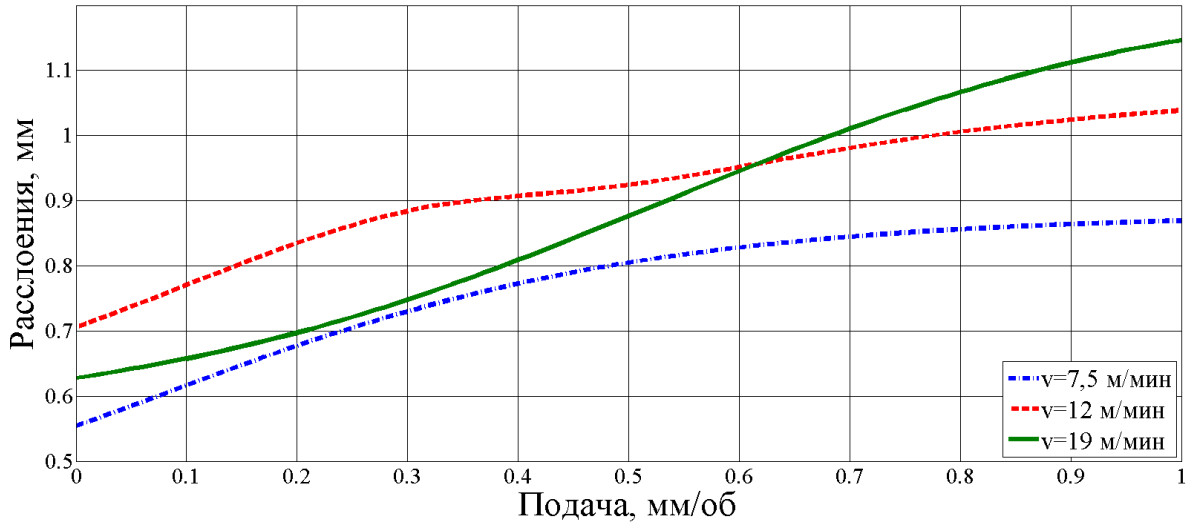
Сопоставляя результаты моделирования градиентным методом (рис. 12) и нейронными сетями (рис. 11), можем видеть явное сходство характера кривых – с возрастанием подачи величина расслоений увеличивается. Однако, интервалы изменения размеров дефектов в случаи линейных зависимостей (рис. 12) лежат в более жестких пределах и существенно завышены при подачах до 0,5 мм/об. Таким образом, модели, полученные из экспериментальных данных методом сопряженных градиентов, показали недостаточно согласованный с экспериментом количественный прогноз размера дефектов, что ограничивает их применение на практике. Поэтому для прогнозирования размеров расслоений при сверлении отверстий в стеклопластике и углепластике рекомендовано использовать искусственные нейронные сети.



а)

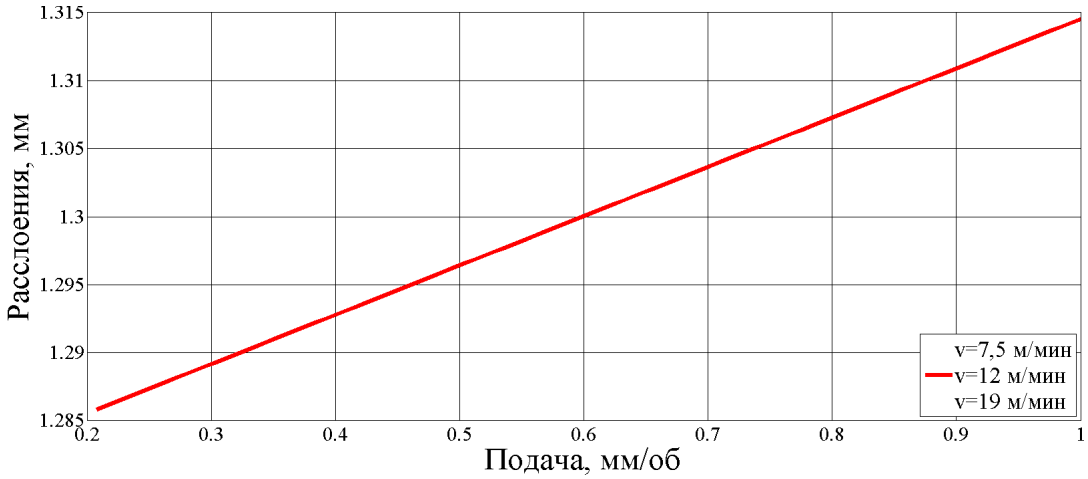


б)

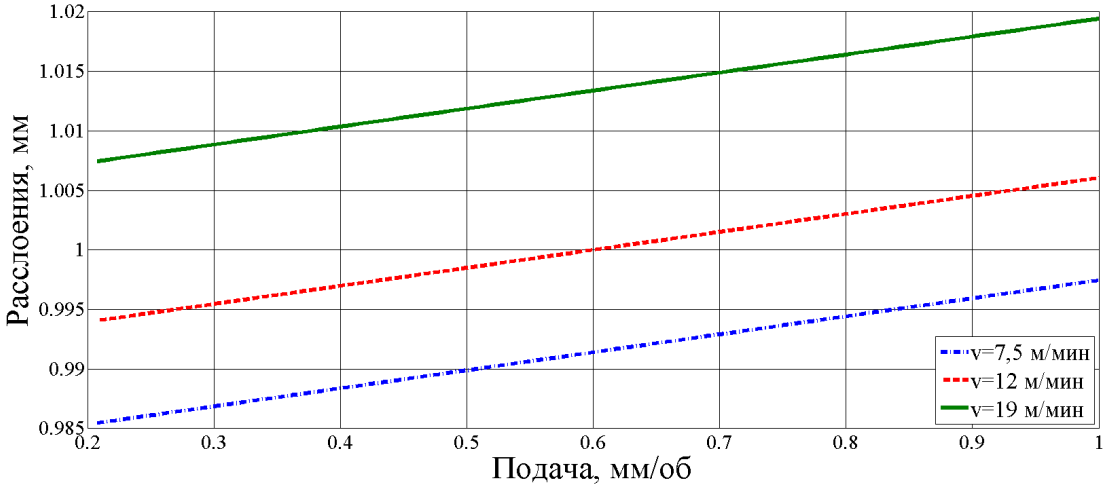


в)

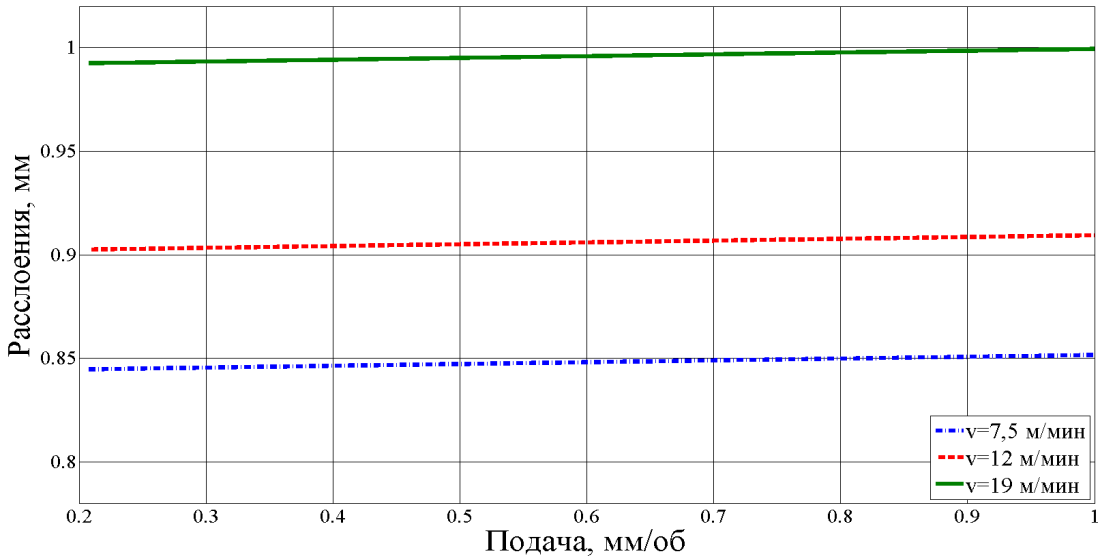
Рис. 10 Отклики ИНС расслоений, зависящих от подачи при постоянной скорости резания на выходе из отверстия: а) сверло тип 1, б) сверло тип 2, в) сверло тип 3



а)



б)



в)

Рис. 11 Зависимости расслоений на выходе из отверстия от подачи при постоянной скорости резания, выделенные из линейных двухфакторных моделей: а) сверло тип 1, б) сверло тип 2, в) сверло тип 3

Заключение

Производство современных высокотехнологичных образцов гражданской и военной техники, которые были бы конкурентоспособны на мировом рынке, невозможно без широкого внедрения в производство цифровых технологий. Авиационная промышленность, как одна из самых наукоемких отраслей, является драйвером развития всего машиностроения, создает основу для качественного изменения структуры российской экономики и ее перехода к модели устойчивого инновационного развития. Сокращение технологического отставания отечественной промышленности возможно только через тесную связь «производство – наука», причем тенденцией последних лет стало стирание четких границ между узко прикладными и научными знаниями, о чем неоднократно упоминается в государственной программе «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденной Правительством РФ от 15.04.2014 № 301.

В работе представлен системный подход к реализации конструкторско-технологической подготовки производства летательных аппаратов с применением цифровых технологий на предприятии ПАО «Роствертол». Теоретические исследования авторов базируются на основных положениях технологии машиностроения, теории вероятностей и математической статистики, теории нейронных сетей и градиентных методов нелинейной оптимизации.

Представлены математические методы с применением CAD/CAM систем для решения проблем, возникающих при переходе производства от физических моделей и плазово-шаблонного метода увязки деталей вертолета к электронному макету изделия. На примере особо ответственной детали ЛА показаны возможности OMW технологий для реализации виртуального базирования и принципов адаптивной механической обработки. Исследована и экспериментально обоснована эффективность применения элементов искусственного интеллекта на базе нейронных сетей как средства прогноза качества механической обработки авиационных деталей.

Полученные в работе научные и прикладные результаты прошли апробацию в условиях механосборочного и лопастного производства ПАО «Роствертол», а также использовались при выполнении плановых НИОКР Южного научного центра Российской академии наук (2015-2017 г.г.) и при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований 15-08-00849А («Разработка численных и экспериментальных методов создания оптимальной структуры армированных стекло- и углепластиков авиационного применения»).