

УДК 621.9.02-229

Е.В. Тесленко¹, Д.С. Тесленко², В.В. Андреев¹,**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА «ВАЛ-ВТУЛКА»
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева²

Рассмотрена задача прогнозирования состояния соединения с натягом деталей типа «вал-втулка» и выбора посадок с помощью нейросетевых алгоритмов, базируясь на существующих пакетах прикладных программ. Предложена модель, отражающая связь между факторами, влияющими на образование натяга в соединении (входы модели), и предельным натягом (выход модели). Представлены результаты исследования. Программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» входит в интеллектуальную информационную систему автоматизированной технологической поддержки CAD-проектирования, которая реализует активную поддержку технологической подготовки производства.

Ключевые слова: соединения деталей, нейронные сети, прогнозирование состояния соединений, интеллектуальная информационная система.

Эффективность современного производства определяется ресурсоёмкостью и надёжностью изделий. Улучшение этих показателей качества позволит повысить конкурентоспособность отечественной промышленности. При этом качество узлов и агрегатов в значительной степени зависит от качества подвижных и неподвижных соединений деталей.

Соединения типа «вал-втулка» получили самое широкое применение в узлах и агрегатах. Необходимые свойства соединений обеспечивают различными сочетаниями размеров сопрягаемых поверхностей, которые называют *посадками* [1].

Известно три метода назначения посадок: эмпирический, подобия и расчетный [2]. Эмпирический метод предполагает применение посадки, уже подтвердившей работоспособность в аналогичном соединении. Метод подобия заключается в сопоставлении конструктивных признаков и условий эксплуатации проектируемого соединения с признаками и условиями, указанными в справочных материалах, после чего назначается рекомендуемая посадка. Расчетный метод сводится к определению предельных размеров сопрягаемых поверхностей, которые обеспечивают нормативный запас прочности в неподвижном (рис. 1) или запас на износ в подвижном соединении.

Запас прочности неподвижных соединений необходим в связи с трудностью выявления отклонений от геометрической формы сопрягаемых деталей, приводящих к ослаблению соединения. Особенно это относится к отклонениям формы втулки, не выявляемым при контроле отверстия непроходной пробкой.

Эффективность создания запасов на износ или прочность соединений оценивается повышением срока службы машин на 30-50%.

В системах автоматизированного проектирования (САПР) с помощью ЭВМ выбираются готовые конструкторские решения с указанием тех полей допусков и посадок элементов деталей, которые оправдали себя на практике.

Общие недостатки перечисленных методов:

- сложность выявления признаков подобия;
- вероятность использования ошибочных рекомендаций;
- отсутствие достоверных данных о влиянии отклонения формы и качества сопрягаемых поверхностей на работоспособность соединения.

В настоящее время основой для выбора посадок являются производственный опыт и экспериментальные данные.

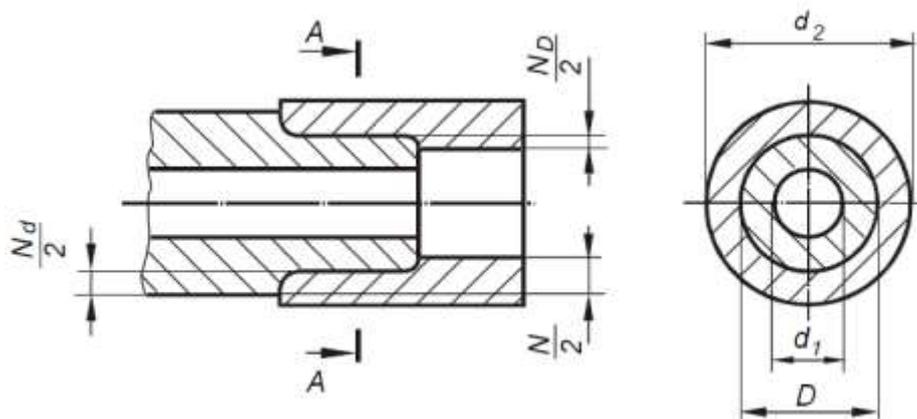


Рис. 1. Соединение с натягом втулки и вала

Известные методики расчета соединений «вал-втулка» являются приближенными, так как не учитывают все факторы, влияющие на соединение. Их применяют для предварительного определения зазоров и натягов, которые могут обеспечить работоспособность в заданных условиях эксплуатации.

На надежность соединения с натягом влияет свыше 20 факторов [3]: это физико-механические свойства материалов вала и втулки, их геометрические параметры, технология сборки, условия эксплуатации, усталость материала, фреттинг-коррозия, остаточные напряжения и т.д. Для учета влияния большинства факторов пока нет математических соотношений и экспериментальных данных.

В настоящее время существуют программы для расчета натягов в соединениях «вал-втулка»: *ANSYS*, *Solid Works Simulation (CosmosWorks)*, *ELCUT*, а также ряд прикладных программ [4, 5, 6]. В этих программах заложены методики расчета, которые не учитывают реальную геометрию детали, отклонения формы, микронеровности поверхностей и другие факторы. Это объясняется недостатком эмпирических данных и сложностью построения интегральных аналитических моделей, связывающих большое число факторов и условий.

В работе предложена методика и программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» посредством нейросетевых алгоритмов.

Входными данными для работы нейронной сети является множество, которое составляют факторы, влияющие на образование натяга (зазора) в соединениях. Размерные факторы при этом поступают с 3D-модели детали. Выходными данными (результатом работы системы) являются прогнозируемые предельные натяги (зазоры), получаемые в результате соединения поверхностей деталей. Задача нейронной сети – подбор весовых коэффициентов для прогнозирования натягов (зазоров).

Рассмотрим задачу прогнозирования состояния соединения с натягом деталей типа «вал-втулка» по эмпирическим данным как задачу обучения нейронной сети.

Для решения поставленной задачи была сформирована искусственная нейронная сеть (ИНС) прямого распространения [7].

Для создания и обучения ИНС использовался программный продукт *Neural Network Wizard*. Обучение производилось на базе обучающей выборки, содержащей 400 строк примеров рассмотренных вариантов соединений. Чтобы ускорить процесс обучения сети, необходимо перед обучением правильно подобрать обучающую выборку с учетом влияния каждого параметра на всем диапазоне его значения. Был выполнен анализ факторов, оказывающих существенное влияние на работу соединений с натягом.

Исследование проводилось на основе экспериментальных данных, экспертного оценивания и теории принятия решений. Полученные результаты представлены в табл. 1. Перечень используемых материалов деталей представлен в табл. 2. Рассмотрены следующие методы запрессовки:

- механическая без смазки;
- механическая со смазкой;
- нагрев втулки;
- охлаждение вала.

С целью формирования эффективной нейронной сети выполнялись работы по определению структуры НС и формы представления данных для обучения НС.

Таблица 1

Факторы, влияющие на величину натяга и прочность соединения вала и втулки

№ п/п	Факторы		
	Фактор	Обозначение	Расшифровка
1	s_1	D	Номинальный диаметр соединения
2	s_2	d_1	Диаметр внутреннего отверстия вала
3	s_3	d_2	Наружный диаметр втулки
4	s_4	L	Длина соединения вала и втулки
5	s_5, s_6		Материал вала, втулки
6	s_7, s_8	μ_d, μ_D	Коэффициенты Пуассона вала, втулки
7	s_9, s_{10}	E_d, E_D	Модуль упругости вала и втулки, Н/м ²
8	s_{11}	P	Продольная осевая сила, Н
9	s_{12}	M	Крутящий момент, Н м
10	s_{13}	F	Коэффициент трения
11	s_{14}, s_{15}	σ_T	Предел текучести материалов вала и втулки, Н/м ²
12	s_{16}		Метод запрессовки
13	s_{17}, s_{18}	Rz_d, Rz_D	Шероховатость вала, втулки, мкм
14	s_{19}, s_{20}	K_1, K_2	Величина смятия неровностей, %
15	s_{21}, s_{22}	t°_d, t°_D	Температура вала и втулки при эксплуатации (рабочая)
16	s_{23}	ρ	Плотность, кг/м ³
17	s_{24}, s_{25}	α	Коэффициент линейного расширения материала вала и втулки
18	s_{26}, s_{27}	TF_d, TF_D	Отклонение формы сопрягаемых поверхностей
19	s_{28}	v	Скорость вращения, м/с

Таблица 2

Исследуемые материалы соединяемых деталей

Материал деталей	
Вал	Втулка
Сталь 30-50	Сталь 30-50
Сталь 30-50	Чугун СЧ 28-48
Сталь 30-50	Магниево-алюминиевые сплавы
Сталь 30-50	Латунь
Сталь 30-50	Бронза
Бр.ОЦС6-6-3	Чугун 15-32
Бр.АЖ-9-4	Сталь 45
Бр.АЖН-11-6-6	Сталь 45

Показатели эффективности определялись с точки зрения величины ошибки в прогнозировании предельных натягов как результата действия совокупности факторов. Критерием обучения была среднеквадратическая ошибка (СКО) по контрольной выборке.

В процессе моделирования использовались трех- и четырехслойные ИНС прямого распространения сигнала (без обратных связей). В качестве функции активации использовалась сигмоидальная функция с параметром сигмоиды $\alpha=1$. Обучению подвергались ИНС с алгоритмами с разным числом нейронов в скрытом слое (N_c). Для обучения сети была сфор-

мирована обучающая выборка. Выборка разделена на две части: 80% выборки использовано для обучения, остальная часть - для тестирования работы сети. Скорость обучения $v=0,1$.

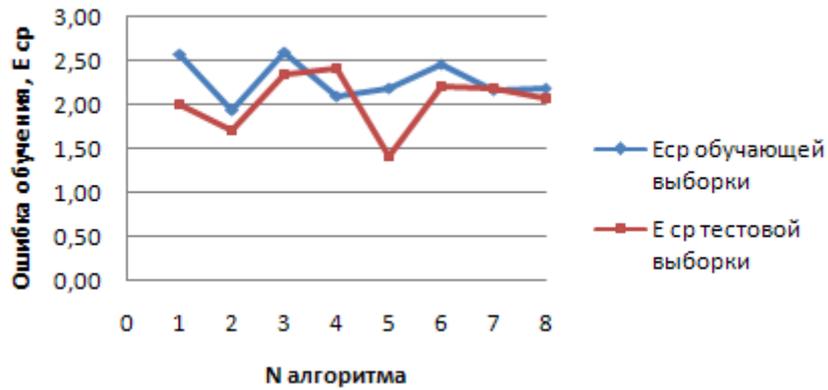


Рис. 2. Ошибка обучения НС на обучающей и тестовой выборках

После обучения большого количества искусственных нейронных сетей была выбрана наилучшая с минимальным СКО.

Анализ разных алгоритмов НС показал, что для поставленной задачи прогнозирования предельных натягов наименьшее время обучения и наименьшую ошибку прогноза имел трехслойный персептрон с алгоритмом 5 (рис. 2). Эти показатели были достигнуты за 3862 эпохи обучения.

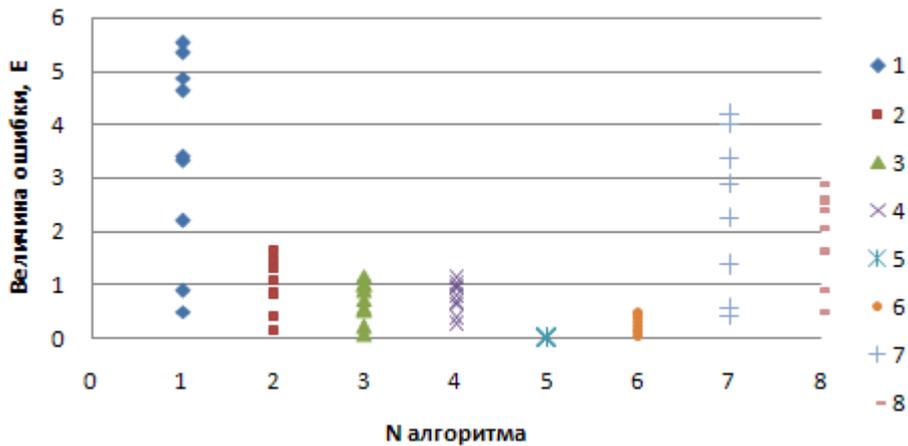


Рис. 3. Величина квадратической ошибки на контрольной выборке для алгоритмов

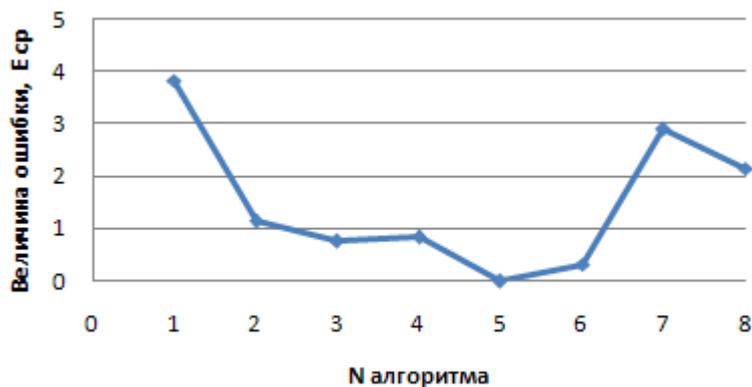


Рис. 4. Величина средней квадратической ошибки трехслойной НС на контрольной выборке для алгоритмов

Наименьшую ошибку прогнозирования предельного натяга на контрольной выборке имела сеть с алгоритмом 5, наибольшую ошибку - трехслойная НС с алгоритмом 1 ($N_c = 20$, структура: 20-20-1) (рис. 3). Среднеквадратическая ошибка для нейронной сети с алгоритмом 5 составила 0,0023 (рис. 4). В результате эксперимента была выбрана трехслойная сеть с алгоритмом 5, имеющая количество нейронов в скрытом слое $N_c = 24$, структура: 20-24-1.

Иллюстрацией качества работы нейронной сети является график зависимости фактических значений выходной переменной $Y_{\text{жел}}$ (Y -Observed) от предсказанных (прогнозируемых) значений Y (Y -Predicted) (рис. 5). Точки этого графика расположены достаточно близко к прямой, лежащей под углом 45° к осям координат, следовательно, модель достаточно хорошо построена.

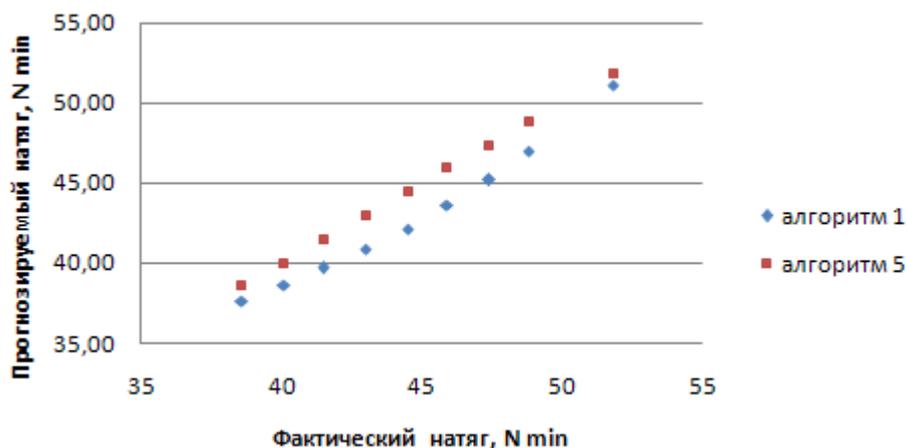


Рис. 5. График качества работы сети, алгоритмы 5 и 1 соответственно

Наиболее важный в практическом использовании этап работы с сетью – выполнение нейропрогноза. Для этого использовалась обученная и протестированная ИНС. Добавив в контрольное множество несколько дополнительных примеров наблюдения, в которых выходные значения – предельное значение минимального натяга N_{\min} пока неизвестны (поэтому они принимаются равными нулю) и, запустив нейропредсказатель, получим отклик сети (рис. 6).

Результаты нейромоделирования хорошо аппроксимируют фактические данные, и средняя квадратическая ошибка составляет менее 1%.

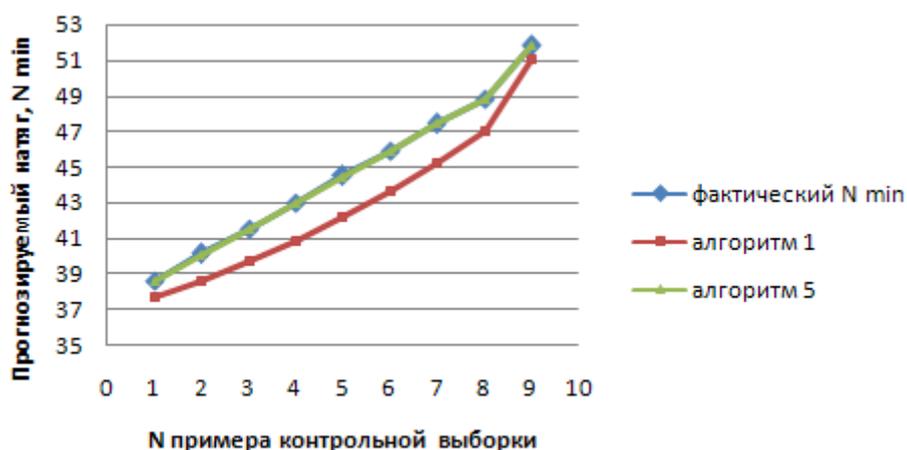


Рис. 6. Сравнение фактического минимального натяга с нейропрогнозом

Это позволяет сделать вывод, что смоделированная сеть будет чувствительна к вариации входных параметров и, следовательно, может быть использована для прогнозирования

состояния соединений «вал-втулка» деталей машиностроения. Сеть способна обобщить закономерность на новые данные.

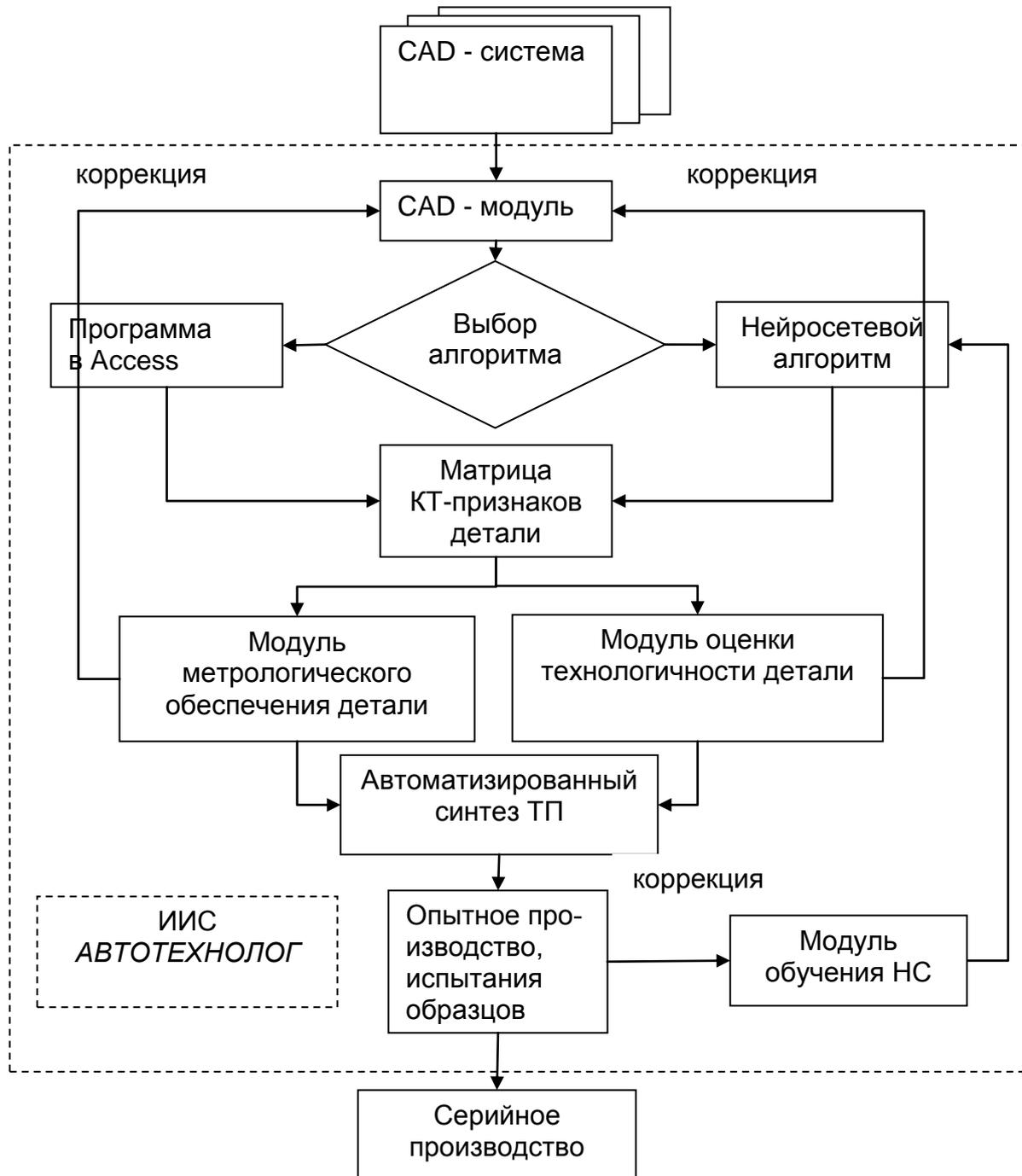


Рис. 7. Работа модуля обучения ИС на реальных данных, получаемых экспериментально при испытаниях деталей в процессе сборки

Объективно существующее ограничение объема обучающей выборки предлагается компенсировать, дообучая сеть с использованием накапливаемых данных.

В результате исследования разработан модуль обучения ИИС, используемой в системе, представленный на рис.7. В результате постоянного сбора экспериментальных данных о прочности соединений с натягом и поступления их на вход нейронной сети сеть самообучается на более широком диапазоне данных. Это позволяет точнее прогнозировать натяги.

Аналогично может быть построена НС для прогнозирования состояния подвижных соединений с зазором.

Программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» входит в интеллектуальную информационную систему (ИИС) автоматизированной технологической поддержки CAD-проектирования. ИИС *АВТОТЕХНОЛОГ* реализует активную поддержку конструкторско-технологической подготовки производства. Система включает в себя автоматизированные модули назначения посадок, модуль формирования матрицы конструктивно-технологических признаков (КТ) детали [8]. В состав системы входит также модуль численной оценки технологичности и уровня метрологического обеспечения деталей.

Разработанная информационная система позволяет сделать выбор посадки обоснованным, более точным, выполняемым в автоматическом режиме. Это обеспечит надежность работы соединений и повысит качество изделий машиностроения.

Библиографический список

1. ГОСТ 25347-82 ОНВ. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки.
2. **Дунаев, П.Ф.** Допуски и посадки. Обоснование выбора / П.В. Дунаев, О.П. Леликов, Л.П. Варламова. – М.: Высшая школа, 1984. – 112 с.
3. **Гречищев, И. С.** Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление / И. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 247с.
4. **Басов, К. А.** ANSYS: Справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 640
5. **Алямовский, А. А.** SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2004. – 432 с.
6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. - ПК «ТОР», Санкт-Петербург, 2010. – 345 с.
7. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей: [пер. с англ.] / Р. Каллан. – М.: ИД «Вильямс», 2001. – 208 с.
8. **Андреев, В.В.** Автоматическое формирование массива конструктивно-технологических признаков деталей интеллектуальной информационной системой / В.В. Андреев, Е.В. Тесленко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 170–172.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2011*

E.V. Teslenko, D.S. Teslenko, V.V. Andreev

CONDITION FORECASTING OF CONNECTION TYPE “SHAFT-BUSHING” WITH A NEURAL NETWORK

The problem of the condition forecasting of connecting type "shaft-bushing" under the empirical data is examined as a problem of neural network training. We have suggested a model which reflects the connection between factors, influencing tightness formation in connection (model inputs), and tightness limit (model exit) and presented the results of our research. The program forecasting the condition of connection type "shaft-bushing" is included into intelligent information system of the automated technological support of CAD-designing which implements active technological preparation support of manufacture.

Key words: connection of details, neural networks, the condition forecasting of connections, intelligent information system.