

УДК 669.017: 539.43

А.В. Миронов<sup>1</sup>, В.В. Андреев<sup>2</sup>**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Институт ядерной энергетики и технической физики<sup>2</sup>

Рассмотрен способ восстановления информации об условиях, при которых происходило циклическое нагружение с использованием математических моделей, описывающих поведение металлов при данном виде внешнего воздействия. Прогнозирование поведения рассматриваемой системы выполняется с учетом свойств структурно чувствительного показателя сопротивления усталости, результатов применения обобщенного анализа и программ, реализующих искусственную нейронную сеть в составе информационной системы восстановления информации.

*Ключевые слова:* усталость металлов, структурно чувствительный показатель, условия испытаний, восстановление описания, интеллектуальная информационная система.

Основным видом внешних воздействий на конструкционный материал при эксплуатации деталей машин и конструкций считается циклическое нагружение. Данное воздействие оказывается различными эксплуатационными нагрузками, термоциклированием, воздействием высокого или низкого давления. При циклическом нагружении численные значения показателей сопротивления материала данному воздействию ниже, чем в случае действия однократной нагрузки. Кроме того, свойства материалов будут существенно зависеть от того, в условиях каких совокупностей действующих факторов будет происходить циклическое нагружение. Усталостное разрушение приводит к существенно неблагоприятным последствиям в форме отказов технических устройств и вызываемыми этим авариями. Последствия таких аварий в условиях современных устремлений на интенсификацию производственных процессов с одновременной экономией средств на производство и модернизацию могут приводить к тяжелым последствиям для здоровья обслуживающего персонала и населения, а также к значительным экономическим потерям в различных отраслях промышленности. В качестве примера подобного разрушения представлен усталостный излом зубьев ведомой шестерни (рис. 1).



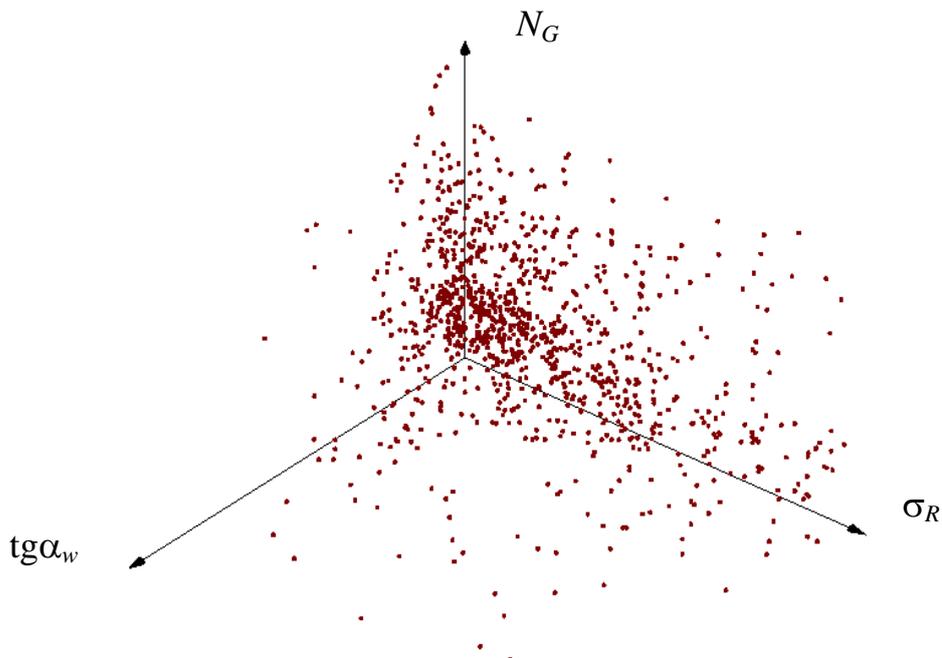
**Рис. 1. Усталостный излом зубьев ведомой шестерни**

Экспериментальное определение величины показателей сопротивления усталости в каждом конкретном случае дорого в силу многообразия рассматриваемых ситуаций и длитель-

ности выполнения экспериментальных работ, необходимых для построения кривой усталости (построение одной кривой усталости в многоциклового области требует разрушения в исследуемых условиях 20-30 образцов, на что уходит до недели непрерывной работы экспериментальной установки). Математическое моделирование данного явления осложняется отсутствием необходимых эмпирических данных для “наполнения” аналитических зависимостей и отсутствием адекватной процедуры учета межфакторных взаимодействий, усиливающих или, наоборот, ослабляющих индивидуальный вклад того или иного фактора в итоговое значение показателей сопротивления усталости. Наиболее подходящим для решения этой задачи представляется использование свойств структурно чувствительного показателя сопротивления усталости в процессе построения обобщенных моделей поведения металлов при циклическом нагружении. Данный прием позволяет обоснованно объединять в рамках единой математической модели поведения материала многообразные разнородные экспериментальные данные по усталости металлов и сплавов и решать различные прикладные задачи используя результаты этого объединения. В частности, целью нашего исследования являлась попытка реализации процедуры “прогноза наоборот” – восстановления информации о действующих при циклическом нагружении факторах на основе ограниченного набора показателей сопротивления усталости. Данная задача возникает, например, в случае проведения различного рода экспертиз при необходимости подтверждения воздействия на разрушившийся объект предусмотренных штатными условиями эксплуатации факторов, либо в случае необходимости “заполнения пустот” в описании действующих факторов при формировании различных баз данных по экспериментальным результатам. В такой постановке рассматриваемая задача относится к классическим задачам “data mining” или задачам “интеллектуального анализа данных”, в рамках которых среди обширного объема данных (в нашем случае - экспериментальных результатов по усталости металлов и сплавов, накопленных к настоящему времени) имеющих разнородный характер (количественных, качественных, текстовых) необходимо выявить конкретные и понятные результаты (восстановить информацию обо всех, либо о наиболее существенных, условиях испытаний (о действующих факторах).

Попытки традиционного построения математических моделей, которые бы описывали связь “действующие факторы – показатели сопротивления усталости” осложняются в первую очередь отсутствием необходимого объема экспериментальных данных. Методы планирования эксперимента, оптимизирующие объем экспериментальных работ путем, например, формирования дробных реплик [1], в нашем случае неприемлемы, в силу обширности перечня факторов различной природы (конструктивных, технологических, эксплуатационных) и высокой стоимости экспериментальных данных. В то же время экспериментальных данных к настоящему времени накоплено достаточно много, например [2], однако эти данные представлены в литературе в виде результатов узких исследований влияния какого-либо конкретного фактора и, кроме того, имеют, как правило, “рыхлый” характер (в описании условий экспериментов отсутствует информация обо всех действующих факторах и их параметрах). Различные приемы совместного учета коэффициентов индивидуального влияния конкретного фактора (например, их простое перемножение или перемножение с возведением в какую-либо степень, как представлено, например, в обзоре таких методов, выполненном в [3]) не универсальны, поскольку соответствуют ограниченному объему экспериментов, выполненных автором конкретного приема. Наиболее удачным в плане объединения всех накопленных к настоящему времени результатов экспериментального определения показателей сопротивления усталости представляется прием построения обобщенных моделей поведения металлов при циклическом нагружении, использующий в качестве своей основы свойства структурно чувствительного показателя сопротивления усталости. Известны результаты исследований ряда ученых-материаловедов [4, 5, 6], связывающих совокупность действующих факторов с величиной структурно-чувствительного показателя сопротивления усталости. Таким показателем принято считать тангенс угла наклона кривой усталости к оси числа

циклов нагружения ( $\text{tg}\alpha_w$ ) в том случае, когда кривую усталости представляют в логарифмической системе координат. Значение угла наклона будет определять положение точки перелома кривой усталости в многоциклового области, имеющей следующие координаты: по оси ординат –  $\sigma_R$ , (МПа) – предел выносливости, по оси абсцисс –  $N_G$ , (циклов нагружения до разрушения объекта). Кроме того, определяя поведение материала при циклическом нагружении структурно-чувствительный показатель сопротивления усталости определяет и положение левого круто наклоненного участка кривой усталости – положение любой точки, лежащей на кривой. Такие точки принято называть *ограниченными пределами выносливости*, они лежат выше точки перелома и имеют следующие координаты: по оси ординат –  $\sigma_{RN}$ , (МПа) – ограниченный предел выносливости, а по оси абсцисс –  $N$  – число циклов нагружения, соответствующих указанному ранее уровню нагрузки. Зная три указанных параметра: угол наклона кривой усталости к оси числа циклов нагружения, величину ограниченного или физического предела выносливости, то есть ординату точки на кривой усталости и число циклов нагружения, которое им соответствует (абсцисса точки на кривой усталости) – можно спрогнозировать всю кривую усталости (ее многоциклового область) и решать стоящие перед исследователем прикладные задачи, например, задачу определения остаточного ресурса. Однако простое сопоставление этих параметров друг с другом для большого количества кривых усталости не дает возможности получить какие-либо функциональные зависимости в силу значительного разброса значений параметров сопротивления усталости, что вызвано разнообразным действием совокупностей факторов. В качестве примера представлены результаты простого сопоставления друг с другом кривых усталости, полученных экспериментальным путем и приведенных в [2] (рис. 2).



**Рис. 2. Сопоставление кривых усталости в трехмерном пространстве, показателей сопротивления усталости, представленных в традиционной форме:**

$\sigma_R$  – предел выносливости, МПа;  $N_G$  - число циклов нагружения до разрушения объекта;  
 $\text{tg}\alpha_w$  - тангенс угла наклона кривой усталости к оси числа циклов нагружения.

(Диапазон изменения указанных величин 50-1000МПа,  $10^4$ - $10^8$  циклов нагружения, 0,001 – 4 соответственно)

В трехмерном пространстве, образованном координатными осями (“ $\sigma_R - N_G - \text{tg}\alpha_w$ ”), представлены 1179 точек. Каждая точка соответствует экспериментальной кривой усталости,

хранящейся в базе данных, ее точке перелома. Диапазон изменения величины показателей сопротивления усталости приведен в подрисуночной подписи.

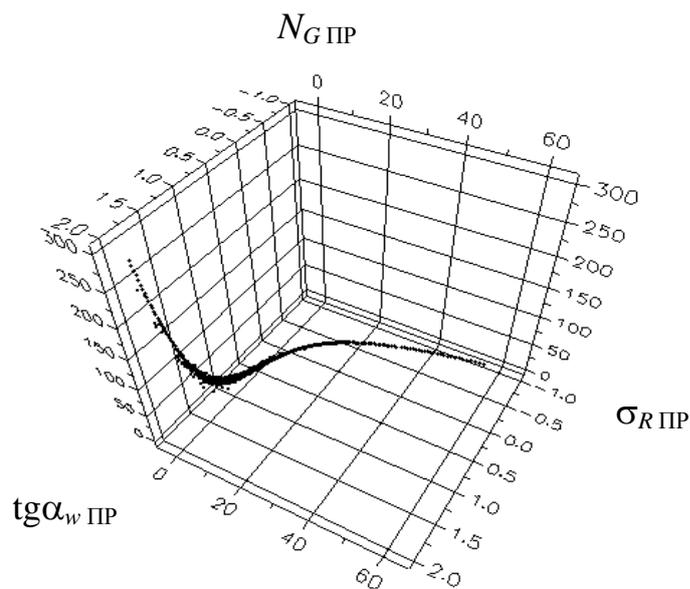
Известен прием решения подобных проблем в рамках обобщенного анализа [7], который можно представить как особый способ уменьшения трудностей, обусловленных множественностью аргументов. В начале решения, ценой утери некоторой доли информации (т.е. исключения некоторых индивидуализирующих особенностей физического процесса), достигается уменьшение числа аргументов и в таком виде решение доводится до конца. Затем, посредством достаточно простой дополнительной операции, информация (и, следовательно, индивидуализация процесса) полностью восстанавливается.

Реализация данного алгоритма применительно к экспериментальным результатам по многоцикловой усталости металлов и сплавов [8, 9]

позволила перейти в новое пространство приведенных показателей сопротивления усталости и там получить ряд практически функциональных зависимостей между показателями сопротивления усталости в их приведенной форме.

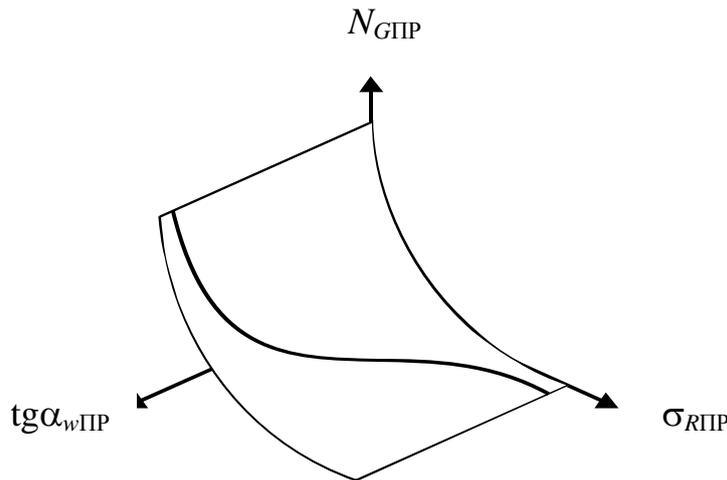
Обобщенную зависимость приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении физических пределов выносливости) и обобщенную поверхность приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении точек, лежащих выше предела выносливости) можно рассматривать как универсальные математические модели, описывающие поведение металлов при данном виде воздействия.

В качестве примера представлены основные элементы пространства приведенных показателей сопротивления усталости (рис. 3). Практически сплошная линия из точек представляет собой результат подбора аппроксимирующей зависимости для всех сопоставляемых кривых усталости; точки по соседству с ней – экспериментальным путем полученные кривые усталости представленные в преобразованном пространстве.



**Рис. 3. Основные элементы пространства приведенных показателей сопротивления усталости - кривые усталости в преобразованном пространстве и обобщенная зависимость приведенных параметров сопротивления усталости**

Далее (рис. 4) представлено схематичное изображение обобщенной зависимости и обобщенной поверхности приведенных параметров сопротивления усталости в пространстве преобразованных показателей сопротивления усталости.

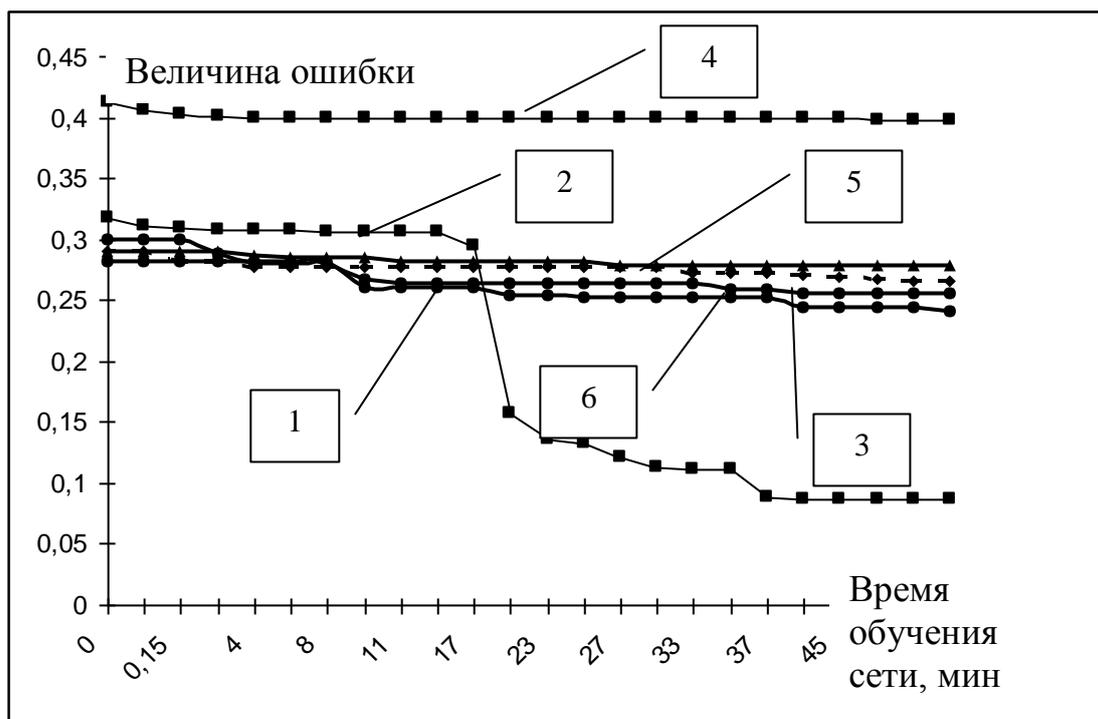


**Рис. 4. Схематичное изображение поверхности приведенных параметров сопротивления усталости с выделенными на ней точками, соответствующими физическим пределам выносливости металлов и сплавов – обобщенной зависимостью приведенных параметров сопротивления усталости**

Фактически, процедура преобразования показателей сопротивления усталости в их приведенные аналоги позволяет перейти в некоторое условное трехмерное пространство, в котором удобно выполнять необходимые преобразования. Для практического использования получаемых полезных результатов необходимо лишь произвести обратное преобразование (восстановление) показателей сопротивления усталости из их аналогов. Каждая экспериментально полученная кривая усталости в приведенном пространстве формирует и уточняет обобщенную зависимость или обобщенную поверхность (располагаясь на них). Смена совокупности действующих факторов изменяет угол наклона кривой усталости, смещает кривую усталости вдоль обобщенной зависимости, в результате чего изменение претерпевают координаты точки перелома кривой усталости (предел выносливости и абсцисса точки перелома). В рассмотренном приведенном пространстве каждая кривая усталости на обобщенной зависимости представляется точкой с тремя координатами. Это как бы свернутая форма хранения информации об особенностях действующих условий и поведении материала в ответ на оказанное воздействие. Очевидно, что существуют задачи, при решении которых возникает необходимость движения в направлении, как бы обратном тому, что было рассмотрено ранее. То есть при известных значениях показателей сопротивления усталости требуется расшифровка (восстановление) описания тех условий, при которых были получены конкретные значения показателей сопротивления усталости. Решение задачи в такой постановке требует увеличения размерности рассматриваемого пространства приведенных показателей сопротивления усталости: каждый фактор можно рассматривать как координату в таком пространстве и конкретное значение параметров сопротивления усталости будет действительно формироваться полной совокупностью действующих факторов. Недостаток эмпирических данных при работе в данном направлении (их “рыхлость”) было решено компенсировать использованием программы, реализующей искусственную нейронную сеть.

Для создания и обучения искусственной нейронной сети использовался программный продукт компании NeuroProject NeuroShell2, который содержит в себе реализацию следующих типов искусственных нейронных сетей: сеть Ворда, сеть с общей регрессией с генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев, сеть с обходными соединениями, трёхслойная сеть со стандартными соединениями. В теории нейронных сетей существуют две актуальные проблемы, одной из которых является выбор оптимальной структуры нейронной сети, а другой – построение эффективного алгоритма обучения нейронной сети. Для поиска оптимальной структуры ИНС были исследованы все указанные ранее типы искусственных нейронных сетей. Входы для нейронной сети представляли собой кодирован-

ные значения действующих факторов, а выходами являлись значения показателей сопротивления усталости. Выполнялось исследование с целью определения типа нейронной сети и формы представления данных при обучении нейронной сети, которые обеспечили бы наибольшую эффективность работы программы. Показатели эффективности определялись с точки зрения времени, необходимого на обучение сети, и с точки зрения величины ошибки в определении показателей сопротивления усталости как результата действия совокупности факторов. Создав и обучив ИНС на нашем наборе данных с помощью NeuroShell2, был получен график зависимости ошибки, выдаваемой сетью на тестовом наборе данных, полученной по всем выходам для каждого примера обучающей выборки, усредненной по всем примерам обучающей выборки, в зависимости от времени обучения. Далее (рис. 5) представлены результаты расчета величины ошибки прогнозирования показателей сопротивления усталости как функции действующих факторов в зависимости от типа сети и от формы представления показателей сопротивления усталости – в приведенной или традиционной форме.



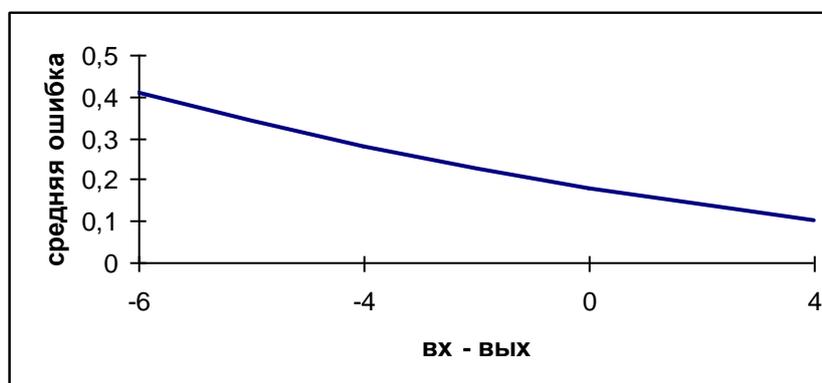
**Рис. 5. Результаты расчета ошибки прогнозирования показателей сопротивления усталости от действующих факторов на сетях различных типов и для разных форм представления показателей сопротивления усталости (в приведенной и традиционной форме):**

1 и 5 - сеть Ворда, традиционная и приведенная форма представления параметров сопротивления, соответственно; 2 и 4 - нейронная сеть с общей регрессией с генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев, приведенная форма представления параметров сопротивления и традиционная форма представления параметров сопротивления соответственно; 3 и 6 – трехслойная нейронная сеть со стандартными соединениями, традиционная и приведенная форма представления параметров сопротивления соответственно

Из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что для описания поведения нашей системы и для решения задачи восстановления информации об условиях испытаний на усталость металлов оптимальной будет нейронная сеть с общей регрессией и генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев и приведенной формой представления показателей сопротивления усталости.

Указанная последовательность использования нейронной сети соответствовала решению задачи прогнозирования в прямом направлении – от описания действующих факторов к значениям показателей сопротивления усталости. Положительные результаты работы про-

граммы, реализующей ИНС, позволили сначала поставить, а затем и решить задачу прогнозирования и в обратной последовательности. Действительно, если сеть позволяет решить задачу прогнозирования в прямой постановке, то нельзя ли ее решить в обратном направлении - нельзя ли задать значения показателей сопротивления усталости и по ним, пользуясь всеми приведенными ранее результатами, подобрать один (может быть, наиболее вероятный) вариант совокупности действующих факторов. Формально, обобщенная зависимость и обобщенная поверхность позволяют реализовать эту задачу, однако нужно представлять себе, что, очевидно, одно и то же значение угла наклона кривой усталости может быть получено при различных комбинациях действующих факторов. При этой оговорке становится понятно, что решение задачи восстановления информации о совокупности действующих факторов предполагает некоторую неопределенность. Однако, как следует из работ по обобщенному анализу, системы, для которых в процессе перехода к безразмерным критериям были получены одинаковые значения приведенных показателей сопротивления усталости, будут подобны друг другу несмотря на то, что конкретные совокупности действующих факторов будут различны, например, по совокупности факторов, либо по значению параметров в пределах одинаковой совокупности. Данное положение позволяет несколько упростить задачу, например, путем получения необходимой информации в ходе испытания образцов-свидетелей, циклически нагружаемых в условиях, подобных искомой ситуации с точки зрения воздействия на материал, но технически реализуемых более просто. Как первый шаг на пути ее решения должны рассматриваться некоторые упрощенные ситуации – восстановления искомых значений (количественных параметров) для отдельных факторов при известных остальных, либо восстановление информации о факторе, действие которого оказывается наиболее существенным. Работа ИНС и последующая оценка точности восстановления информации подтвердили эти, в общем, очевидные предположения. В качестве переменных рассматривались показатели сопротивления усталости (в количестве трех) и факторы, формирующие условия нагружения (температура, асимметрия цикла, частота нагружения, шероховатость поверхности и т.д. – всего девять факторов). Были рассмотрены ситуации, при которых параметры сопротивления задавались всегда, а число факторов, известных и неизвестных, варьировалось. Далее показаны результаты расчета ошибки восстановления информации в зависимости от разности между числом известных и числом неизвестных (восстанавливаемых) факторов (рис. 6).

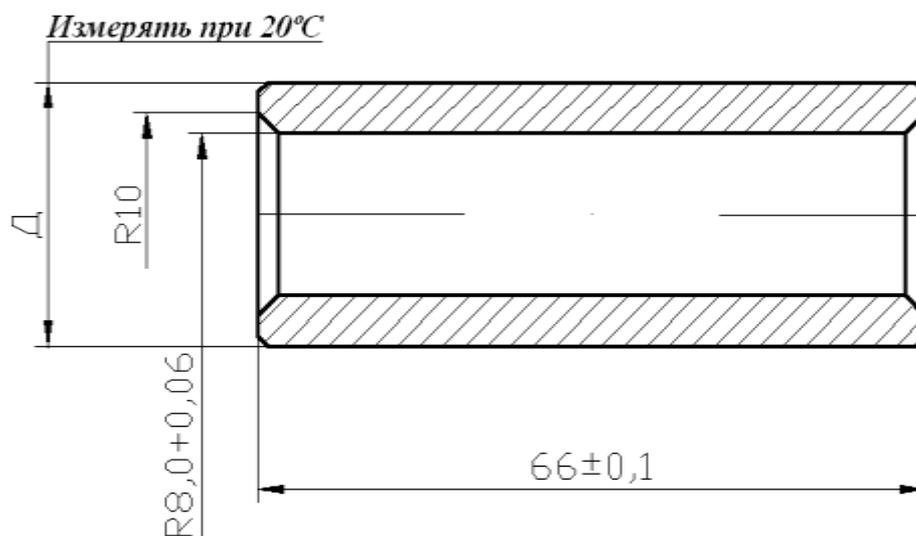


**Рис. 6. Зависимость величины ошибки восстановления информации от соотношения числа известных и восстанавливаемых факторов (на рисунке обозначено как (vx-vyx))**

В процессе обучения ИНС в качестве обучающей и экзаменующей выборок рассматривались строки базы данных об условиях испытаний и значениях показателей сопротивления усталости, а также была найдена оптимальная форма для представления показателей сопротивления усталости, предъявляемых сети и определено оптимальное соотношение числа входов и выходов, предъявляемых сети в качестве известных величин и величин, получае-

мых в результате ее работы. Показатели сопротивления усталости должны быть предъявлены ИНС в приведенной форме, то есть в виде безразмерных параметров, образующих практически функциональную зависимость. Точность восстановления информации зависит от соотношения входов (числа известных параметров сопротивления усталости и известных факторов) и выходов (числа восстанавливаемых кодированных значений действующих факторов). Была реализована система программного обеспечения, позволяющая решать задачу восстановления информации, в частности [10].

В качестве практической задачи, предъявляемой уже обученной ИНС, были рассмотрены результаты испытаний на усталость поршневого пальца двигателя автомобиля, представленного на рис. 7.



**Рис. 7. Чертеж пальца поршневого двигателя автомобиля, испытания на усталость которого моделировались в процессе восстановления информации о действующих факторах**

Сравнение результатов работы программы восстановления информации и описания факторов, фактически имевших место при циклическом нагружении, показали, что в условиях стендовых испытаний программа позволяет надежно определять до трех действующих факторов, что согласуется с результатами численного моделирования работы программы, представленными на рис. 6.

Дальнейшее увеличение числа искомых неизвестных приводит к неприемлемому увеличению ошибки при восстановлении информации.

#### Библиографический список

1. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 285 с.
2. **Трощенко, В.Т.** Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наук. думка, 1987. – 1303 с.
3. **Акимов, Л.М.** Выносливость жаропрочных материалов / Л.М. Акимов. – М.: Metallurgy, 1977. – 152 с.
4. **Трощенко, В.Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
5. **Гребенник, В.М.** Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования / В.М. Гребенник. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
6. **Шетулов, Д.И.** Прогнозирование долговечности деталей машин по нестандартным физико-механическим параметрам конструкционных материалов / Д.И. Шетулов, В.В. Андреев // Изв. РАН. Металлы. 1998. №3. С. 55-59.
7. **Гухман, А.А.** Обобщенный анализ / А.А. Гухман, А.А. Зайцев. – М.: Факториал, 1998. – 304 с.

8. **Андреев, В.В.** Предел выносливости металлов на обобщенной зависимости приведенных параметров сопротивления усталости: учеб. пособие / В.В. Андреев; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 304 с.
9. **Андреев, В.В.** Анализ многомерных данных по усталости металлов на основе представления экспериментальной информации в пространстве приведенных параметров / В.В. Андреев, А.В. Миронов // Системный анализ и информационные технологии: тр. третьей международной конференции САИТ-2009. – Звенигород, 2009. С. 19.
10. **Андреев, В.В.** Программа оценки эффективности различных стратегий обучения искусственной нейронной сети при выполнении восстановления информации об условиях испытаний на усталость // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем.: официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам / В.В. Андреев, Е.Д. Варламова, А.В. Миронов. – М., 2007. № 3. С. 190.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2010*

**A. V. Mironov, V.V.Andreev**

### **FORECASTING OF THE CYCLIC LOADING CONDITIONS ON THE BASIS OF THE GENERALIZED MODELS OF THE METALS BEHAVIOUR AT THE GIVEN KIND OF THE EXTERNAL EFFECT**

In the given article the way of the restoration of the information on conditions at which occurred cyclic loading is considered. This task carried out with using of the metals behavior mathematical models. Modeling of the behavior of the considered system carried out with using of the structurally sensitive parameter properties, the results of application of the generalized analysis and the programs realizing an artificial neural network in the structure of the information system of the information restoration.

*Key words:* fatigue of metals, the structurally sensitive parameter, conditions of cyclic loading, the information restoration, the information system.