

Миронов Д. Н.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМОСИЛОВЫХ НАГРУЗОК

(Белорусский национальный технический университет)

В статье смоделирован процесс разрушения и представлена методика диагностики текущего состояния сложной механической системы с помощью метода искусственных нейронных сетей.

**Ключевые слова:** разрушение механической системы, диагностика механической системы, метод искусственных нейронных сетей.

### Моделирование процесса оценки состояния сложной механической системы.

Контроль за техническим состоянием осуществляется непосредственно датчиками и аппаратурой, установленными на двигателе и силовых элементах летательного аппарата.

Для непрерывного контроля уровня виброскорости корпуса авиадвигателя, а также для сигнализации о возникновении вибрации с уровнем виброскорости, превышающим допустимый для данного типа авиадвигателя, в настоящее время используют аппаратуру контроля вибрации типа ИВ-200.

Таблица 1

Вариант	Диапазон частот [Гц]	Затухание не менее пяти раз на частотах [Гц]	Погрешность измерения [%]
ИВ-200А	30 - 180	10 и 400	15
ИВ-200АС	30 - 180	10 и 400	15
ИВ-200Б	30 - 150	10 и 300	15
ИВ-200В	45 - 200	15 и 400	15
ИВ-200Г	40 - 195	15 и 400	15
ИВ-200Е	50 - 200	20 и 400	10
ИВ-200К	50 - 200	20 и 400	10

Сигнал от датчика вибрации в виде напряжения, пропорционального виброскорости авиадвигателя, усиливается электронным блоком в требуемой полосе частот.

Усиленный и выпрямленный в электронном блоке сигнал подается на прибор, отградуированный в единицах виброскорости, а также на схему световой сигнализации.

Диапазон частот, контролируемый аппаратурой приведен в таблице 1

Датчик предназначен для преобразования составляющей скорости линейной вибрации, действующей в направлении оси датчика, в электрическое напряжение. Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции.

Основной величиной, характеризующей датчик, является его чувствительность  $K$ , которая равна:

$$K = \frac{U \cdot 1,41}{V} (\text{мВ} / \text{ммГц}),$$

где  $U$  – напряжение на выходе датчика в мВ;  $V$  – скорость вибрации, измеряемая датчиком в  $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$  и равная  $2\pi fS$ , где  $f$  – частота вибрации в Гц;  $S$  – амплитуда смещения в мм. Прибор предназначен для отсчета скорости вибрации двигателя. В качестве прибора применен микроамперметр магнитоэлектрической системы. Шкала прибора отградуирована в единицах виброскорости.

В последнее время для контроля деталей двигателя, планера, систем управления, изготовленных из немагнитных материалов все шире начинают применять метод

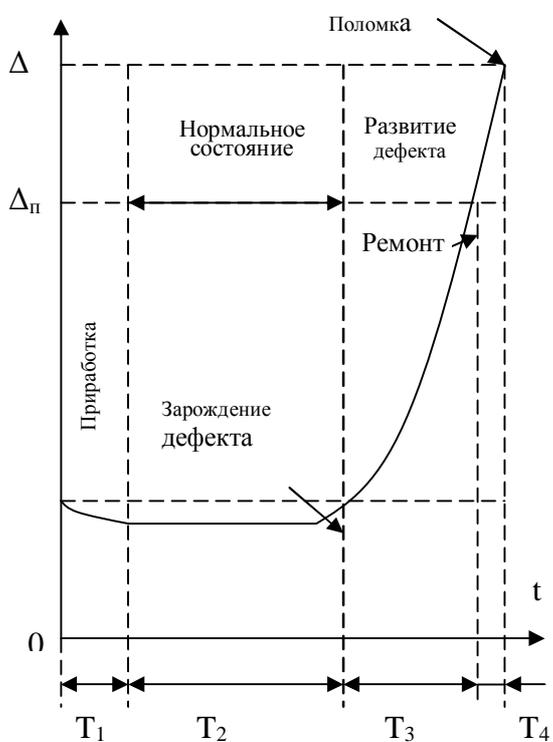


Рис. 1. Этапы жизненного цикла детали

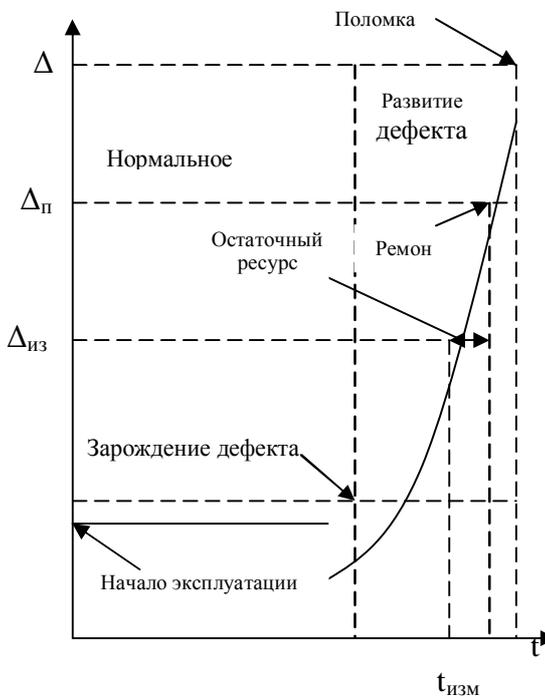


Рис. 2. Прогнозирование жизненного цикла детали

вихревых токов реализованный в дефектоскопах ВДЦ-1М, ВДЦ-2, ВДЦ-3.

Для оценки состояния силовых элементов и деталей авиационного двигателя в процессе эксплуатации, разработан ряд мероприятий позволяющих контролировать их техническое состояние.

### Оценка технического состояния и прогнозирование работы оборудования по полученной информации.

Каждый параметр имеет эталонное значение, которое характеризует бездефектное состояние объекта. Для оценки технического состояния необходимо определить фактические величины контролируемых параметров. Разность между фактическим и эталонным значениями диагностических параметров представляет собой диагностический симптом.

Формула для определения диагностического симптома:

$$\Delta = q_{\phi} - q_{\text{эт}}.$$

Таким образом, оценка технического состояния объекта определяется отклонением фактических значений его параметров от их эталонных значений. Следовательно, любая система технической диагностики работает по принципу отклонений (принцип Солсбери).

Кроме оценки состояния оборудования необходимо прогнозировать его работоспособность [1]. Для этого анализируются тренды – зависимость диагностического симптома от времени.

На рисунке 1 представлен тренд, характеризующий четыре этапа изменения характеристик вибрации, что соответствует четырем этапам жизненного цикла детали (модуля). Первый этап  $T_1$  – приработка машины, второй  $T_2$  – нормальная работа, третий  $T_3$  – развитие дефекта, четвертый  $T_4$  – этап деградации (устойчивое развитие цепочки дефектов с момента, когда появляется потребность в обслуживании или ремонте объекта, до момента возникновения аварийной ситуации).

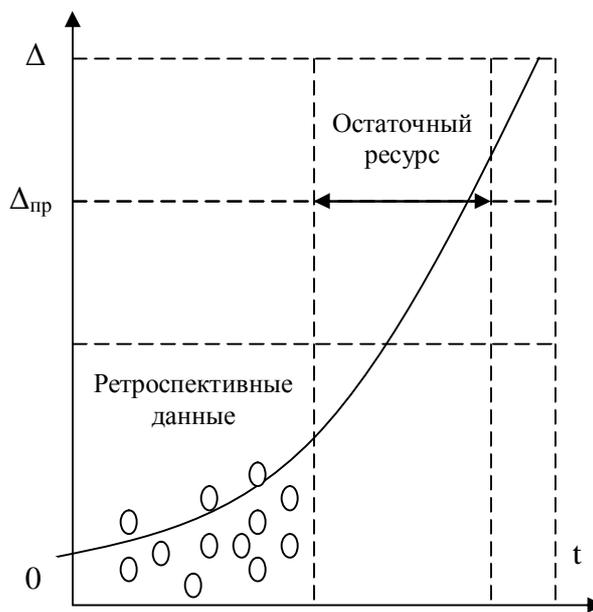


Рис. 3. Диагностический симптом

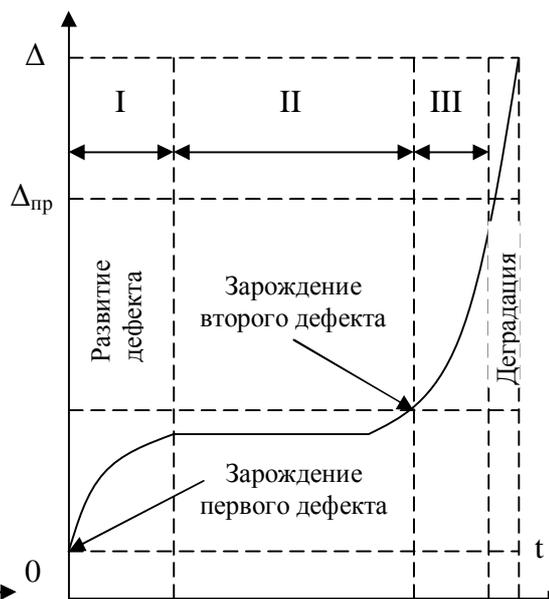


Рис. 4. Тренд подобных механизмов

Наибольшая практическая сложность для решения задач диагноза и прогноза состояния машин возникает на первом этапе. Это обусловлено возможностью появления

специфических дефектов изготовления и монтажа машины, многие из которых после приработки исчезают, что затрудняет дальнейшую оценку ее состояния.

Существует два основных вида прогнозирования состояния объектов диагностики:

первый – по тренду, построенному в результате аппроксимации ретроспективных данных диагностических симптомов с дальнейшей экстраполяцией аппроксимирующей функции. В этом случае прогнозирование требует знания предельного значения диагностического симптома  $\Delta_{np}$  и фактической кривой тренда, который совсем не обязательно бывает линейным и может характеризоваться большим разбросом точек. При условии монотонности тренда остаточный ресурс может быть оценен в первом приближении как интервал времени с момента последнего измерения диагностического параметра до момента времени, соответствующего точке пересечения тренда с линией, характеризующей предельное значение диагностического симптома  $\Delta_{np}$  (рис. 3).

второй вид прогнозирования – по заранее известному тренду, построенному с момента начала нормальной работы однотипных машин до полного их выхода из строя, т. е. по всему жизненному циклу подобных механизмов (рис. 2). Тогда остаточный ресурс в первом приближении может быть оценен как разность времени  $t_{np}$ , соответствующего предельному значению диагностического симптома  $\Delta_{np}$ , и времени  $t_{изм}$ , соответствующего значению диагностического симптома  $\Delta_{изм}$  на момент измерения диагностического параметра.

Во многих практических случаях тренды могут быть немонотонны. Так, на рисунке 4 представлен тренд, участок I которого характеризует развитие одного дефекта, на участке II наблюдается стабилизация уровня вибрации и на участке III производная изменения уровня вибрации увеличивается в результате появления еще одного дефекта. В этом случае достоверный прогноз состояния объекта и оценка остаточного ресурса возможны только на последнем участке развития цепочки дефектов.

Методы последовательной детализации, гомогенизации и дискретизации, при совместном применении, позволяют проблемы диагностики сложной механической системы, какой является авиационный двигатель, свести к решению последовательности задач для систем более простых. Причем введение иерархической структуры системы на основе модели искусственной нейронной сети дает возможность моделировать процесс разрушения как процесс передачи сигнала в сети с низшего уровня иерархии системы на более высокий при достижении порогового значения параметром, характеризующим уровень поврежденности. Модель последовательного перехода процесса состояния системы с уровня на уровень не исключает сценариев катастрофического развития процессов разрушения, когда вследствие разрушения детали какого-либо низшего уровня результат ведет сразу к выходу из строя жизненно важной детали высшего уровня иерархии системы. Однако катастрофические явления – события маловероятные и требуют отдельного более тщательного рассмотрения. Предложенная модель исходит из постепенности процессов старения деталей двигателя в процессе их эксплуатации.

Рассматриваемая модель деградации свойств материала и накопления повреждений описывает последовательные процессы перехода с низших уровней состояния на более высокие при достижении определенных пороговых значений. Вертикальная иерархическая структура позволяет создать модель диагностики в виде графа, корень которого оп-

ределяется модулем двигателя верхнего уровня, а листья структуры соответствуют состоянию материалов и структур низшего уровня.

Помимо вертикальной иерархии можно рассмотреть модели горизонтальной иерархии на каждом слое нейронной сети, однако это существенно усложнит рассматриваемую схему и потребует дополнительных исследований. Представление модели диагностики любого из узлов высшего уровня в виде графа позволяет автоматизировать процесс диагностики, поиска наиболее слабого звена, используя методы решения задач оптимизации на графах.

Метод последовательной детализации позволяет структурировать процесс решения сложной задачи в виде последовательности более простых. Это позволяет автоматизировать процесс, но не уменьшает его объем. Упрощение исходной задачи за счет огрубления структуры системы реализуется на основе методов гомогенизации и дискретизации.

Метод гомогенизации позволяет оценить влияние параметров более низкого уровня на макроскопические (эффективные) параметры системы более высокого уровня интегрально. Наиболее эффективно метод применяется для оценки физико-механических свойств материалов, а также структур типа слоистых, армированных, составных. В данной работе этот метод применяется для расчета эффективных модулей упругости (жесткости) деталей двигателя, масс, инерционных характеристик, плотности в зависимости от параметров, характеризующих деградацию, поврежденность материала. Однако, переход от точных систем дифференциальных уравнений в частных производных упрощает задачу, но недостаточно, чтобы применять ее в инженерных расчетах, поэтому следующим шагом является применение метода дискретизации, который в сочетании с тензорно-геометрическим методом дает возможность перейти от системы с распределенными параметрами, описываемой уравнениями в частных производных к эквивалентной системе с сосредоточенными параметрами, описываемой уравнениями с обыкновенными производными.

Связь спектра колебаний эквивалентной системы с параметром деградации, поврежденности материала дает достаточно простые формулы, позволяющие на основании вибродиагностических испытаний получить оценку уровня деградации, поврежденности материала и остаточного ресурса.

#### **Метод последовательной детализации при моделировании сложных механических систем.**

Термомеханика сложных механических систем описывается системами дифференциальных (интегриродифференциальных) уравнений с частными производными, часто с нечетко известными граничными и начальными условиями. Построение адекватной математической модели реального авиационного двигателя является практически нереальной задачей.

Метод последовательной детализации позволяет структурировать систему на принципе иерархизации уровней разного масштаба. Будем исходить из того, что обычно процесс выхода из строя какого-либо важного компонента двигателя имеет достаточно длительный инкубационный период, в течении которого отсутствуют макроскопические проявления процессов изменения физико-механических параметров деталей двигателя, их геометрических и инерционных характеристик.

Выделим в сложной системе иерархию уровней по следующей схеме. Первый уровень – оболочка (кожух) двигателя, второй уровень: компрессор, камера сгорания,

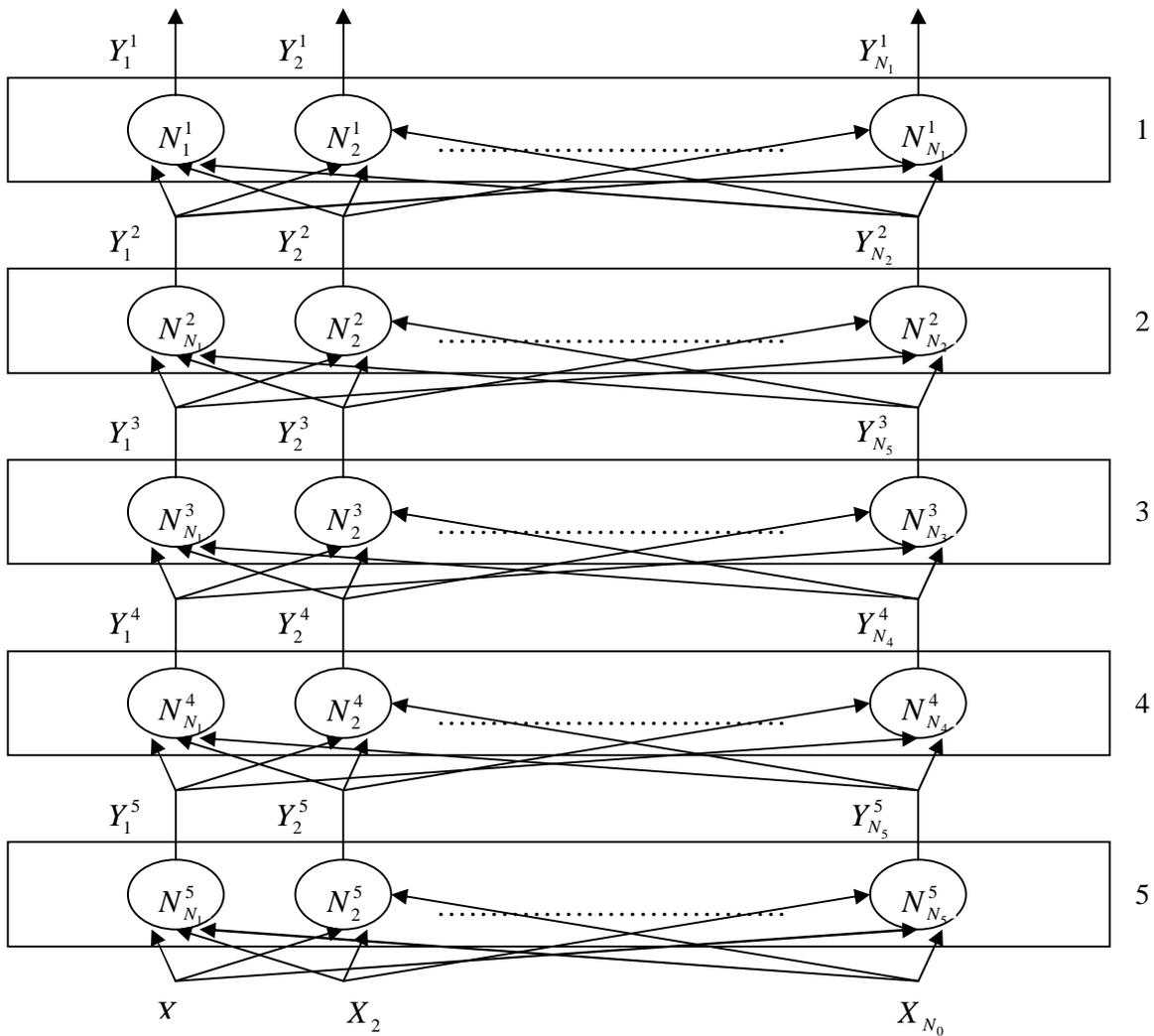


Рис. 5. Схема иерархии сложной механической системы в виде искусственной нейронной сети

турбина, выходное устройство; третий уровень: вал турбины, рабочие лопатки, сопловые аппараты; четвертый уровень: элементы системы охлаждения, крепежа лопаток и валов; пятый уровень: материалы из которых изготовлены детали двигателя.

Система спроектирована так, что двигатель выходит из строя, когда процесс повреждений, начиная с пятого уровня, выходит на второй уровень. В этом случае повреждение носит макроскопический характер, обуславливающий отказ всего двигателя. Исходя из этого будем моделировать процесс выхода из строя крупных деталей как процесс перехода состояния системы с одного иерархического уровня на другой. Применим идеи нейросетевого моделирования для описания процесса. Уровни иерархии представим как слои нейронной сети. Входные переменные  $X_i$  – это воздействия напряжений, деформаций, температур, центробежных сил на параметры

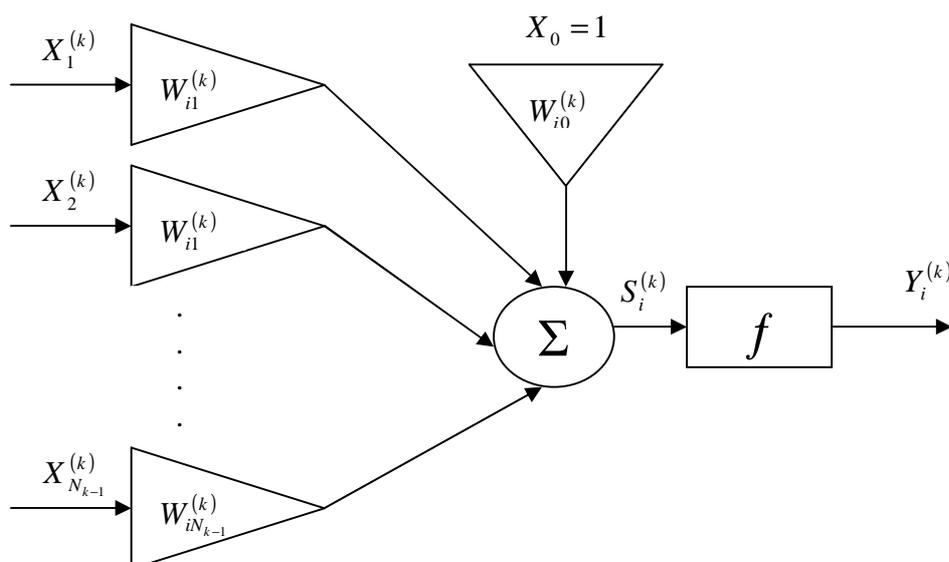


Рис. 6. Схема искусственного нейрона

материалов деталей (уровень 5). По достижении определенного уровня поврежденности он начинает сказываться на состоянии деталей в целом на следующем уровне (рис. 5). Выходные переменные  $Y_i^1$  характеризуют проявление поврежденности деталей на первом уровне. Кружками в слоях обозначены компоненты двигателя данного уровня, каждый из которых имеет определенный предел прочности при каждом цикле термосилового воздействия. Поэтому поведение каждого элемента в слое моделируем искусственным нейроном. Схема нейрона  $N_i^k$  представлена на рисунке 6. Модель искусственного нейрона определяется уравнениями

$$Y_i^{(k)}(t) = f(S_i^{(k)}(t)),$$

$$S_i^{(k)}(t) = \sum_{j=0}^{N_{k-1}} W_{ij}^{(k)}(t) X_j^{(k)}(t).$$

Изменение параметров системы  $W_{i,j}^{(k)}$  определяется моделями накопления повреждений как алгоритмы последовательного изменения весовых коэффициентов  $W_{i,j}^{(k)}(t)$

$$W_{ij}^{(k)}(t+1) = W_{ij}^{(k)}(t) + 2hd_i^{(k)}(t)X_j^{(k)}(t), \quad d_i^{(k)}(t) = e_i^{(k)}(t)f'(S_i^{(k)}(t)),$$

$$e_i^{(k)}(t) = \sum_{m=1}^{N_{k+1}} d_m^{(k+1)}(t)W_{mi}^{(k+1)}(t).$$

Здесь время  $t$  удобно рассматривать как целочисленную величину определяющую количество циклов воздействия термосиловых нагрузок.

Согласно концепции слоистой нейронной сети каждый слой содержит процессоры (нейроны), функционирующие по принципу пороговой логики, а именно, когда сумма воздействий на нейрон достигает пороговой величины, он передает сигнал (воздействие) с данного уровня на следующий. Применительно к рассматриваемой проблеме будем

этот процесс связывать с процессом последовательного накопления повреждений на данном масштабном уровне (слое) и переходом этого процесса на более высокий масштабный уровень. Разрушение носит макроскопический характер, когда процесс выходит на второй уровень, далее на первый (разрушение).

В моделях искусственных нейронных сетей (ИНС) достижение некоторого состояния происходит за счет изменения параметров  $W_{i,j}$  сети (весовых коэффициентов). Системы такого типа, как правило, описываются дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами и называются адаптивными.

В ИНС изменение коэффициентов связывают с обучением (самоорганизацией) на системе тестовых воздействий. В нашем случае изменение параметров системы происходит как результат циклических термосиловых воздействий. Макроскопически это проявляется в изменении материальных коэффициентов среды.

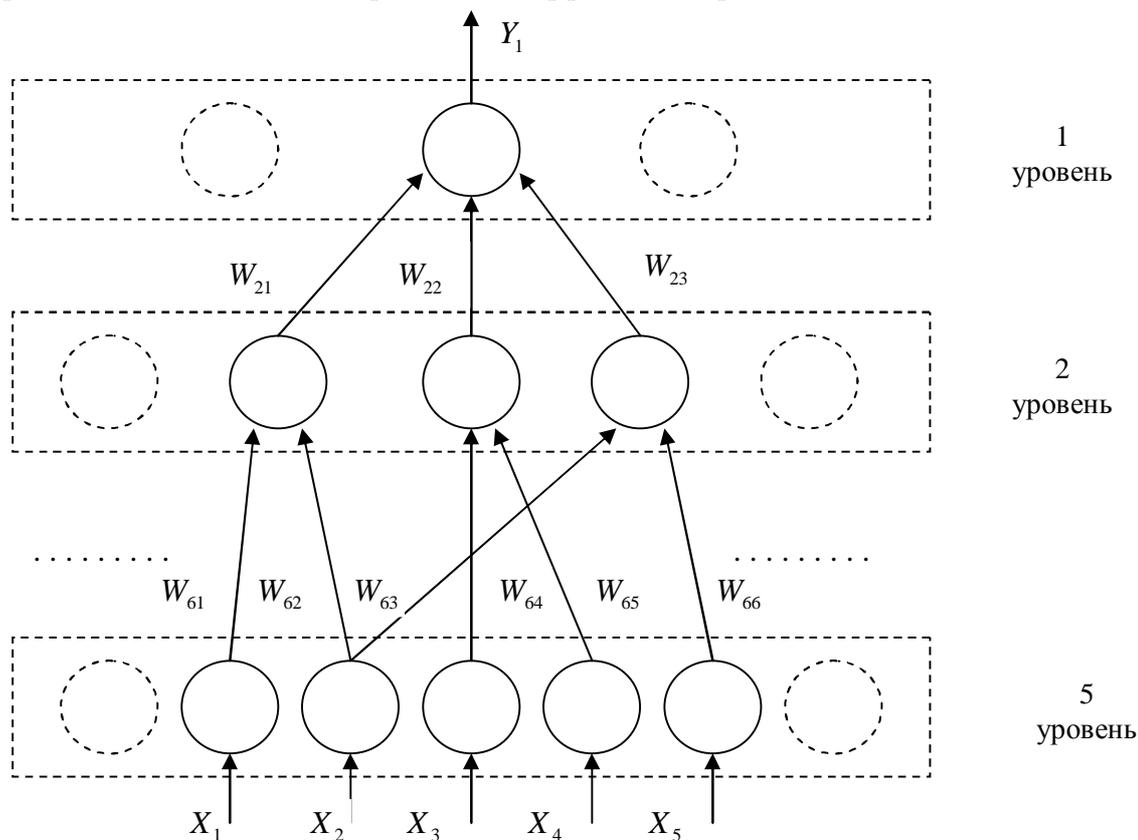


Рис. 7. Нейронная сеть

В настоящее время влияние накопления повреждений на макроскопические свойства материалов описываются с помощью различных моделей накопления повреждений, берущих начало с моделей Работнова и Качанова [1] и исходящих из представлений о том, что в материале появляются микропоры, микротрещины, результатом чего является уменьшение площади (объема) несущей нагрузку. В дальнейшем в результате слияния микротрещин в макротрещину необходимо переходить

в рассмотрении процесса на новый уровень и изучать распространение трещины на основе механики разрушения. Однако, в действительности, процесс накопления повреждений имеет стадию предмикроразрушений, на которой материал меняет свои свойства (деградирует) без образования микропор, микротрещин, т. е. сохраняет сплошность, а его жесткость, плотность могут изменяться.

Введение иерархии компонентов двигателя и последовательной схемы процесса разрушения позволяет разработать методику диагностики текущего состояния подетально. Согласно введенной иерархии, процесс разрушения начинается с нижних уровней, локально и только по достижении некоторых макроскопических (масштабных) значений, характеризующих данный уровень переходит на более высокий. В случае диагностирования состояния целесообразно двигаться в обратном направлении. Сначала оценить макроскопические параметры компонентов высшего уровня, выделить из них наиболее поврежденный, затем в этом компоненте продиагностировать элементы следующего уровня и т. д. Такой подход позволяет автоматизировать процесс обработки данных используя соответствующие алгоритмы. В результате длительность процесса сокращается, а достоверность полученных результатов повышается.

Исходя из предложенной схемы рассмотрим традиционный подход моделирования процессов термосиловых воздействий на детали двигателя, накопления в них повреждений, изменения физико-механических характеристик в компонентах в компонентах первого, второго уровня.

Изобразим зависимость какого-либо модуля (нейрона) 1-го уровня от модулей более низких уровней в виде графа, составляющей часть нейронной сети, изображенной на рисунке 7. Граф позволяет сформулировать задачи связанные с построением алгоритмов поиска деталей двигателя, состояние которых оказывает максимальное влияние на детали 1-го уровня. Вершина графа 1-го уровня соответствуют детали, которая состоит из деталей 2-го уровня (вершине графа) и т. д. Для сложных систем, описываемых сложными графами целесообразна постановка задачи о поиске минимального пути от детали 1-го уровня до деталей 5-го, которые оказали влияние на макроскопическое состояние детали 1-го уровня. Применение графов в диагностике позволяет использовать методы оптимизации на графах, автоматизируя этот процесс.

#### **Построение математической модели многозвенной модели двигателя тензорно-геометрическим методом.**

Для анализа свойств податливости (жесткости) сложных механических систем в рамках линейных приближений вводится инвариант в виде работы обобщенных сил на малых перемещениях [3]

$$A_y = (\bar{f} d\bar{q}),$$

где  $\bar{f}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных сил,  $d\bar{q}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) упругих деформаций в связях, наложенных на деталь двигателя.

Так как  $A_y$  – скаляр, то в декартовой системе координат его можно записать в виде

$$I_y = \bar{F}^T d\bar{x} = \bar{f}^T \cdot d\bar{q}.$$

Между вектором силы, приведенным к месту наиболее слабой связи и вектором обобщенных сил имеет место связь

$$\bar{f} = I^T \bar{F},$$

где  $\bar{F} = col[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]$  – вектор-столбец ( $6 \times 1$ ), объединяющий компоненты главного вектора и главного момента действующих сил, заданный в декартовой системе координат,  $I^T$  – транспонированная матрица Якоби размерности ( $n \times 6$ ).

Введем динамический инвариант в виде симметричной квадратичной формы обобщенных скоростей

$$I_d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{i,j} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt},$$

где  $I_{i,j}$  – элементы тензора инерции  $I(n \times n)$  механической системы.

Динамический инвариант в декартовой системе имеет вид

$$I_d = 2T = \bar{u}^T I_3 \bar{u}; \quad \bar{u} = I \frac{d\bar{q}}{dt},$$

где  $I_3 = I^{-T} I I^{-1}$  – эквивалентный тензор инерции многосвязного механизма,  $\bar{u}$  – вектор скорости в декартовой системе координат,

$$2T = I_d = \left( \frac{d\bar{q}}{dt} \right)^T I \left( \frac{d\bar{q}}{dt} \right), \quad (1)$$

где  $\left( \frac{dq_1}{dt}, \frac{dq_2}{dt}, \dots, \frac{dq_n}{dt} \right)$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных скоростей деталей двигателя. Выражение (1) позволяет применить формулу Лагранжа для получения уравнений динамической системы. Совокупность выражений для  $C_{\text{ЭУЗ}}$ ,  $I_3$  позволяет построить комплексную математическую модель, которая описывает упругие и инерционные характеристики системы.

Для  $n$ -звенной механической системы математическая модель в Лагранжевой форме имеет вид

$$J(\bar{q}) \frac{d^2 \bar{q}}{dt^2} + h \left( \bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt} \right) = \bar{Q},$$

где  $n$  – число связей;  $\bar{q}$ ,  $\frac{d\bar{q}}{dt}$ ,  $\frac{d^2 \bar{q}}{dt^2}$  – векторы ( $n \times 1$ ) соответственно обобщенных координат, скоростей, ускорений,  $J(\bar{q})$  – матрица инерции системы, зависящая от его конфигурации,  $h \left( \bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt} \right)$  – вектор ( $n \times 1$ ) центробежных и кориолисовых сил, действующих на ротор,  $\bar{Q}$  – вектор ( $n \times 1$ ) обобщенных сил.

Согласно методу дискретизации, построим модель реальной механической системы как композицию абсолютно жесткой системы (тела) с идентичной кинематикой и эквивалентного (эффективного) упругого звена (ЭУЗ). ЭУЗ представляет собой условную многомерную пружину, прикрепленную к центру жесткости детали. Математически ЭУЗ будет описываться диагональной матрицей  $C_{\text{ЭУЗ}} (6 \times 6)$

$$C_{y_{\Sigma}} = \text{diag}[C_x, C_y, C_z, C_{ax}, C_{ay}, C_{az}].$$

Элементами матрицы являются коэффициенты жесткости “пружин” ЭУЗ: три пружины сжатия-растяжения  $(C_x, C_y, C_z)$  и три пружины кручения  $(C_{ax}, C_{ay}, C_{az})$ .

Матрица  $C_{y_{\Sigma}}$  позволяет установить зависимость между главными векторами сил и моментов, приложенных к данному звену системы и упругой деформацией пружин

$$\bar{F} = C_{y_{\Sigma}} d\bar{x},$$

где  $d\bar{x} = \text{col}[dx, dy, dz, d_{ax}, d_{ay}, d_{az}]$  – вектор-столбец  $(6 \times 1)$  малых деформаций пружин эквивалентного упругого звена.

Как известно, в реальных машинах источники упругих деформаций связаны со степенями подвижности (связности). Введем матрицу упругости  $C(n \times n)$ , которая описывает деформации в контактных зонах механической системы

$$\bar{f} = C d\bar{q},$$

где  $f$  – вектор-столбец  $(n \times 1)$  обобщенных упругих сил,  $d\bar{q}$  – вектор-столбец упругих деформаций системы в областях связей (контакта).

Имеет место зависимость

$$C_{y_{\Sigma}} = J^{-T} C J^{-1},$$

где  $J^{-T}$  – транспонированная обратная матрица Якоби.

Таким образом, если известны экспериментальные данные – компоненты матрицы  $C$ , то тогда можно вычислить  $C_{y_{\Sigma}}$ .

г. Минск

Поступила: 9 апреля 2008 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб, В. П. К задаче построения нелинейных моделей накопления повреждений при ползучести / В. П. Голуб, А. В. Романов. // Проблемы прочности. – 1990, – № 6. – С. 9.
2. Никифоровский, В. А. Вероятностный мир / В. А. Никифоровский. – М. : Наука, 1992. – 174 с.
3. Soderberg, C. R. The interpretation of creep tests for machine design. / C. R. Soderberg // Transactions of the ASME. – 1936. – Vol. 58, № 8. – 789 p.

*Mironov D. N.*

### **SIMULATION PROCESSES DEFORMATION OF THE COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF THE THERMO POWER LOADING**

*In the article simulated process of the destruction and presented technique of the diagnostics of the complex mechanical systems in the running time by means of the method artificial neural network.*