

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 658.512.22.011.56:004(076.5)

С.В. Красновская, В.В. Напрасников

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИЖИМНЫХ УСИЛИЙ КРЕПЛЕНИЙ
КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Дается краткий обзор компрессорно-конденсаторной установки и задач математического моделирования. Проводится анализ влияния усилий предварительной затяжки на напряженно-деформированное состояние модели фланца с использованием системы конечно-элементного моделирования, подготовка входных и выходных данных для обучения нейронной сети. Проверяется возможность прогнозирования погрешностей крепления элементов конструкции фланца с использованием нейронных сетей. По аналогии с проведенными расчетами исследуется возможность идентификации прижимных усилий креплений в конструкции компрессорно-конденсаторного агрегата.

Введение

Современная гражданская и военная техника во многих случаях оснащена большим количеством радиоэлектронной аппаратуры. Перегрев радиоэлектронной аппаратуры, которая обычно располагается в замкнутых герметичных объемах, может привести к повреждению всей бортовой электроники и недопустимым отказам. Поэтому системы, отвечающие за теплоотведение, должны оснащаться средствами для охлаждения воздуха, к которым относятся компрессорно-конденсаторные агрегаты (ККА) (рис. 1).

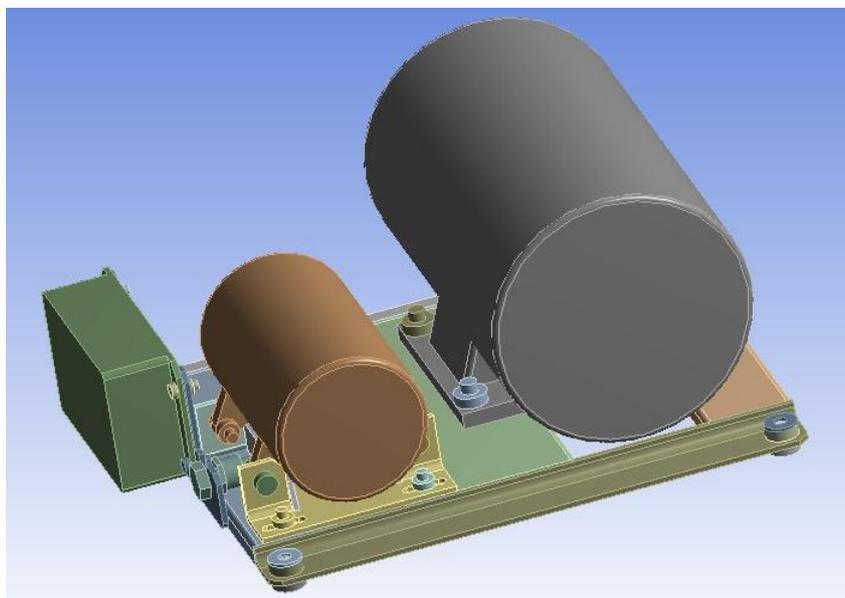


Рис. 1. Пример трехмерной твердотельной модели ККА

Несущим и опорным элементом конструкции ККА является рама, которая обеспечивает возможность его крепления на машину и удобный доступ для технического обслуживания. Она должна обладать достаточной жесткостью для придания целостности механической системе и предотвращения по возможности явления паразитных колебаний.

Одним из требований технических условий для конструкций ККА является отсутствие резонансов в заданном частотном диапазоне. Однако в процессе эксплуатации величины прижимных усилий в местах крепления отдельных элементов могут изменяться, что влияет на спектр собственных частот [1–5]. Таким образом, актуальной является задача построения математических моделей несущих конструкций систем ККА на современных транспортных средствах, оснащенных большим количеством электроники. Эти модели позволяют идентифицировать величины прижимных усилий креплений конструкции.

Задача математического моделирования в технических науках состоит в абстрактном описании изучаемых процессов и явлений, которые в дальнейшем можно воспроизвести виртуально на основе аналитических представлений или численных экспериментов с различными входными данными. Полученные в результате проведения эксперимента выходные данные характеризуют состояние модели и отклик конструкции. Понятия входных и выходных параметров присущи многим математическим методам и моделям и позволяют определять причинно-следственные связи между этими данными. Таким образом, в задачах математического моделирования можно выделить прямые задачи, в которых по известным причинам необходимо найти следствия, и обратные задачи.

Примером прямой задачи может служить модель начально-краевой задачи, где в качестве причин могут выступать начальные и граничные условия, геометрия границ области, объемные воздействия, коэффициенты дифференциальных операторов, описывающих модель, а в качестве следствий – внутренние и внешние поля смещений, напряжений, температуры и электрического потенциала. Основные модели механики деформируемого тела и связанные с ними прямые задачи формировались в течение последних двух столетий. Постановки этих задач являются корректными, т. е. для них доказаны теоремы существования и единственности решений, непрерывной зависимости от входных данных. Среди методов решения прямых задач в настоящее время наибольшее развитие получили метод граничных интегральных уравнений и основанный на нем метод граничных элементов, а также метод конечных элементов (МКЭ). Разрабатываются и успешно применяются в научной и инженерной деятельности программные продукты, реализующие данные методы, в особенности МКЭ.

В обратных задачах часть причин неизвестна, но известна часть следствий в виде дополнительных измерений и требуется определить неизвестную часть причин. В качестве дополнительной информации могут выступать измерения величин на границе тела, например амплитудно-временная или амплитудно-частотная характеристика компонент вектора смещений или ускорения. Решению такого типа задач может препятствовать некорректность постановки, которая выражается в отсутствии непрерывной зависимости от ряда следствий, являющихся дополнительной входной информацией, и в необходимости исследовать достаточность этой дополнительной информации для однозначного восстановления причин. Также невозможно напрямую применить метод граничных элементов и МКЭ. Обратные задачи, как правило, нелинейные. Одним из практических приложений обратных задач является дефектоскопия и развиваемые в ней методы неразрушающего контроля.

Ряд методов решения обратных задач предполагает многократное решение прямой задачи, что используется в итерационном процессе, при построении ядер разрешающих интегральных уравнений, в рамках генетического алгоритма, для формирования обучающей выборки при применении нейронной сети. Использование «быстрого» метода решения прямой задачи является основным фактором эффективного решения обратной задачи [6].

1. Проблема исследования

Целью настоящего исследования является анализ и разработка конечно-элементных моделей, позволяющих принимать обоснованные решения по рациональному проектированию и размещению компонентов конструкций с учетом эксплуатационных нагрузок.

Размещение и крепление элементов влияют на распределение напряжений и смещений в несущей конструкции. Погрешности крепления отдельных составляющих конструкции могут привести к деформации деталей и последующей поломке устройства в целом. Повреждения в резьбовых соединениях возникают главным образом из-за неправильно подобранных компо-

нентов соединения, недостаточного или превышенного усилия затяжки, неравномерного распределения усилия затяжки. Возможность определения погрешностей крепления отдельных элементов по возникающим в работе деформациям позволит предсказать поведение конструкции в ходе эксплуатации.

Определение напряженно-деформированного состояния конструкции представляет собой прямую задачу механики деформированного тела. Каждому заданному набору начальных условий крепления, размещения и прикладываемых усилий соответствуют определенные выходные данные: величина максимального напряжения, координаты узла с максимальным напряжением, величина наибольшей деформации детали, координаты узла с наибольшей деформацией. Задача решается МКЭ с использованием пакета конечно-элементных расчетов Ansys Workbench.

Решение обратной задачи идентификации погрешностей крепления конструкции по величинам смещений в узлах соединения отдельных элементов представляет собой восстановление некоторой неизвестной зависимости по имеющимся экспериментальным данным. В качестве способа решения обратной задачи выбрано использование нейронной сети. Процесс разработки нейронной сети начинается с построения простой сети и исследования архитектур, которые применялись для решения подобных задач. Построение и обучение нейронной сети происходят с использованием инструмента Neural Network пакета MATLAB.

2. Понятие усилия предварительной затяжки

Критичным фактором при затяжке резьбового соединения является усилие предварительной затяжки соединяемых деталей, величина которого косвенно характеризуется крутящим моментом.

Предварительная затяжка соединений подразумевает создание в крепежных и соединяемых деталях некоторых напряжений. При этом в упруго напряженных телах проявляются механизмы пластических деформаций, ведущие к убыванию напряжений во времени, или релаксации напряжений. По истечении времени усилие затяжки соединения несколько снижается без дополнительных силовых воздействий на него.

Усилие предварительной затяжки, на которое производится затяжка резьбового соединения, измеряется в ньютонах и обычно принимается в пределах 75–80 % (в отдельных случаях 90 %) от пробной нагрузки. Пробная нагрузка является контрольной величиной, которую стержневая крепежная деталь должна выдержать при испытаниях. Она приблизительно на 5–10 % меньше произведения предела текучести стержневой крепежной детали на номинальную площадь сечения. В соответствии с ГОСТ 1759.4–87 пробная нагрузка для крепежных деталей с классом прочности 6,8 и выше составляет 74–79 % от минимальной разрушающей нагрузки.

Минимальная разрушающая нагрузка соответствует произведению предела прочности стержневой крепежной детали на номинальную площадь сечения:

$$P_{\text{разр, min}} = R_{m, \text{min}} \cdot A_{s, \text{nom}}, \quad (1)$$

где $R_{m, \text{min}}$ – минимальный предел прочности на растяжение, Н/мм²;

$A_{s, \text{nom}}$ – номинальная площадь сечения болта, винта, шпильки, мм².

Пробная нагрузка соответствует произведению напряжения от пробной нагрузки на номинальную площадь сечения крепежной детали:

$$P_{\text{пр}} = S_p \cdot A_{s, \text{nom}}, \quad (2)$$

где S_p – напряжение от пробной нагрузки, Н/мм²;

$A_{s, \text{nom}}$ – номинальная площадь сечения болта, винта, шпильки, мм².

Таким образом, в соответствии с ГОСТ Р 52627–2006 [7] для крепежной детали с классом прочности 6,8 и резьбой М10, номинальная площадь расчетного сечения которой составляет 58,0 мм², минимальная разрушающая нагрузка равна 34 800 Н, а пробная нагрузка – 25 500 Н.

Принимая усилие предварительной затяжки как 75 % от пробной нагрузки, его величина будет равна 19 125 Н.

Усилие предварительной затяжки не должно приводить к переходу стержневой крепежной детали из области упругой деформации материала в область пластической деформации. Величина данного усилия обусловлена требованиями к соединению и может быть экспериментально определена с использованием датчика силы. В конструкторской документации указывается усилие предварительной затяжки или соответствующее значение крутящего момента затяжки [8, 9]. В среде разработки Ansys Workbench усилие предварительной затяжки моделируется при помощи нагрузки Bolt Pretension. Нагрузка может прикладываться к цилиндрической поверхности, прямой линии в случае линейных тел, одному или нескольким телам, представляющим модель болта под натяжением. Реакции от нагрузки предварительного натяжения могут выражаться в смещении (перемещении, произошедшем из-за преднатяга) и рабочей нагрузке (реакции силы от преднатяга, главным образом суммы всех сил, действующих в разрезе).

3. Нормализация параметров для обучения нейронной сети

При использовании сети во входные элементы подаются значения входных переменных, затем сигналы последовательно отрабатывают нейроны промежуточных и выходного слоев. Для каждого из этих слоев вычисляется свое значение активации как разница между взвешенной суммой выходов элементов предыдущего слоя и пороговым значением. Затем значения активации преобразуются с помощью функции активации и в результате получается выход нейрона. После того как вся сеть отработает, выходные значения элементов выходного слоя принимаются за выход всей сети в целом. Для работы алгоритма требуется, чтобы характеристика входа-выхода нейроподобных элементов была неубывающей и имела ограниченную производную. Обычно для этого используется сигмовидная нелинейность.

Разные по физическому смыслу и сильно различающиеся по абсолютным величинам выборки данных нуждаются в нормализации. Нормализация данных позволяет привести все используемые числовые значения переменных к одинаковой области их изменения, благодаря чему появляется возможность свести их вместе в одной нейросетевой модели.

Границы интервала нормализации задаются исходя из максимального и минимального значений соответствующей переменной. Если нет возможности точно определить граничные значения, максимальные и минимальные величины берутся из имеющейся выборки.

Линейная нормализация. Переход от традиционных единиц измерения к нормализованным и обратно с использованием метода линейной нормализации осуществляется с помощью следующих расчетных соотношений:

– при нормализации и денормализации в пределах $[0, 1]$

$$\tilde{x}_{ik} = \frac{x_{ik} - x_{\min i}}{x_{\max i} - x_{\min i}}; \quad (3)$$

$$y_{jk} = y_{\min j} + \tilde{y}_{jk}(y_{\max j} - y_{\min j}); \quad (4)$$

– при нормализации и денормализации в пределах $[-1, 1]$

$$\tilde{x}_{ik} = 2 \cdot \frac{x_{ik} - x_{\min i}}{x_{\max i} - x_{\min i}} - 1; \quad (5)$$

$$y_{jk} = y_{\min j} + (\tilde{y}_{jk} + 1)(y_{\max j} - y_{\min j})/2, \quad (6)$$

где x_{ik} – i -е входное значение k -го примера исходной выборки в единицах измерения задачи;
 \tilde{x}_{ik} – соответствующее i -е входное нормализованное значение;
 y_{jk} – j -е выходное значение k -го примера исходной выборки в единицах измерения задачи;
 \tilde{y}_{jk} – соответствующее j -е выходное нормализованное значение;
 N – количество примеров обучающей выборки;

$$x_{\min i} = \min_{k=1,N}(x_{ik});$$

$$x_{\max i} = \max_{k=1,N}(x_{ik});$$

$$y_{\min j} = \min_{k=1,N}(y_{jk});$$

$$y_{\max j} = \max_{k=1,N}(y_{jk}).$$

Нелинейная нормализация. Один из способов нелинейной нормализации – использование сигмоидной логистической функции или гиперболического тангенса. Переход от традиционных единиц измерения к нормализованным и обратно в данном случае осуществляется следующим образом:

– при нормализации и денормализации в пределах $[0, 1]$

$$\tilde{x}_{ik} = \frac{1}{e^{-a(x_{ik}-x_{ci})} + 1}; \quad (7)$$

$$y_{jk} = y_{cj} - \frac{1}{a} \ln \left(\frac{1}{\tilde{y}_{jk}} - 1 \right); \quad (8)$$

– при нормализации и денормализации в пределах $[-1, 1]$

$$\tilde{x}_{ik} = \frac{e^{a(x_{ik}-x_{ci})} - 1}{e^{a(x_{ik}-x_{ci})} + 1}; \quad (9)$$

$$y_{jk} = y_{cj} - \frac{1}{a} \ln \left(\frac{1 - \tilde{y}_{jk}}{1 + \tilde{y}_{jk}} \right); \quad (10)$$

где $x_{ci} = (x_{\min i} + x_{\max i})/2$ – центр нормализуемого интервала изменения входной переменной;
 $y_{cj} = (y_{\min j} + y_{\max j})/2$ – центр нормализуемого интервала изменения выходной переменной.

Параметр a влияет на степень нелинейности изменения переменной в нормализуемом интервале. Чем меньше значение параметра a , тем более пологой выглядит нормализованная зависимость и больше ширина коридора экстраполяции.

На рис. 2 приведены графики нормализации входной переменной для пределов $[-1; 1]$. Для нелинейной нормализации с использованием функции гиперболического тангенса принято значение параметра $a = 1,0$. Совпадение нормализованного значения в обоих случаях имеет место лишь в точке, соответствующей центру нормализуемого интервала. На рис. 3 показаны случаи нелинейной нормализации в пределах $[0; 1]$ с использованием функции гиперболического тангенса с параметрами a , равными соответственно 0,3, 0,5, 1,0.

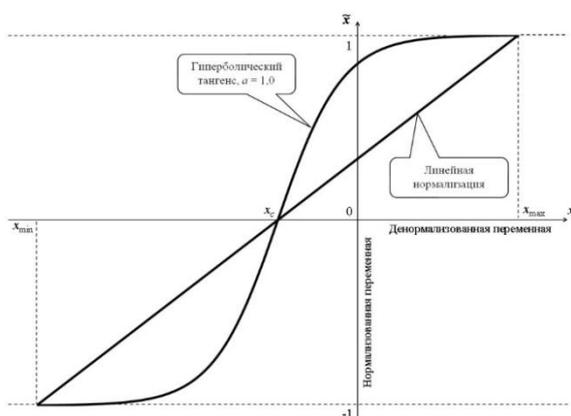


Рис. 2. Сравнение линейной и нелинейной функций нормализации

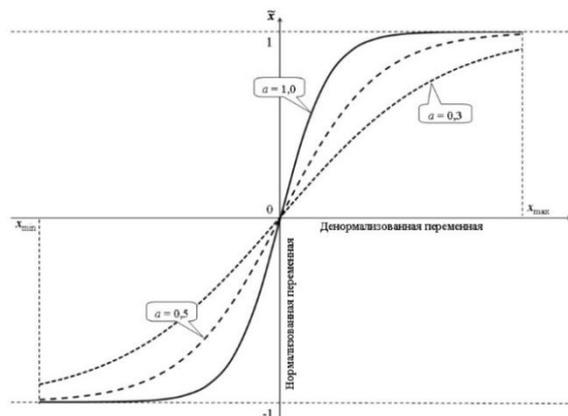


Рис. 3. Влияние параметра на график функции нелинейной нормализации

Вход функции активации нейрона определяется смещением и суммой взвешенных входов. Выход нейрона зависит как от входов нейрона, так и от вида функции активации. Количество нейронов в скрытых слоях отвечает за мощность сети.

Для получения линейного отображения решения применяются нейроны с линейными функциями активации. Когда в выходном слое используются линейные нейроны, выходы сети могут принимать произвольные значения. Линейные нейронные сети не могут формировать нелинейные отображения.

Для нелинейных связей между входом и выходом необходимо использовать нелинейные функции активации, например нелинейные логарифмические сигмовидные функции активации или функции гиперболического тангенса. Если последний слой многослойной сети использует такие функции активации, выходы сети будут ограничены.

Архитектура нейронной сети зависит от конкретной решаемой задачи [10–12].

4. Анализ модели фланца

Фланец представляет собой стальное кольцо с определенным количеством отверстий для болтов, предназначенное для герметичного соединения труб различного диаметра. Фланцы обладают высокой стойкостью к химическому воздействию, они устойчивы к механическим и температурным деформациям.

Созданный фланец имеет четыре болтовых соединения (рис. 4). Внутренний диаметр фланца и его крепления равен 0,04 м, толщина стенки 0,01 м, диаметр болтового отверстия 0,01 м. Проводятся вариативные расчеты со значениями усилия предварительной затяжки, равными 19 000, 10 000, 7000, 3000 Н, в ослабленном болтовом соединении – 1000 Н.

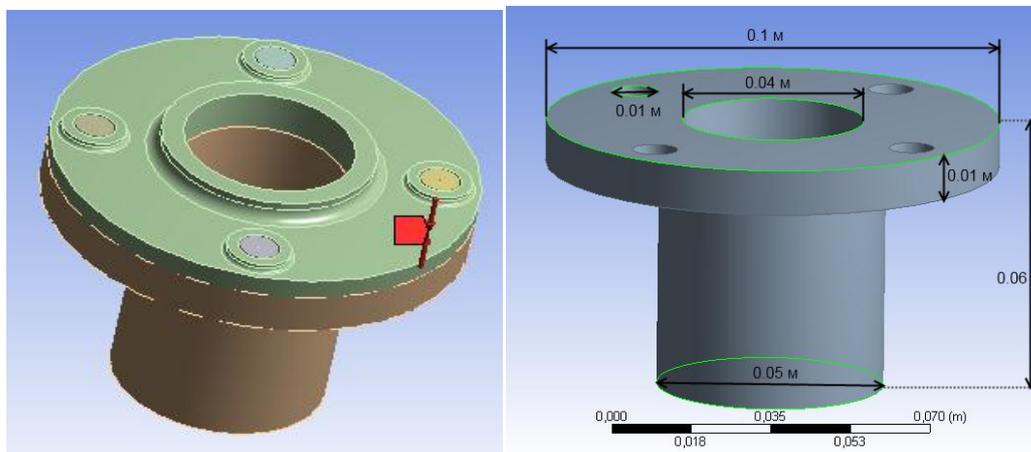


Рис. 4. Модель фланца

Условия нагружения: удаленная сила, приложенная к верхнему торцу фланца, направленная вертикально вверх и равная 1000 Н, действует на втором шаге нагружения; предварительное натяжение болтов на первом шаге нагружения равно 7000 Н на каждом болтовом соединении, на втором шаге нагружения – фиксировано (опция Lock в настройках задаваемой нагрузки).

Общая деформация в конструкции представлена в масштабе 2xAuto (рис. 5).

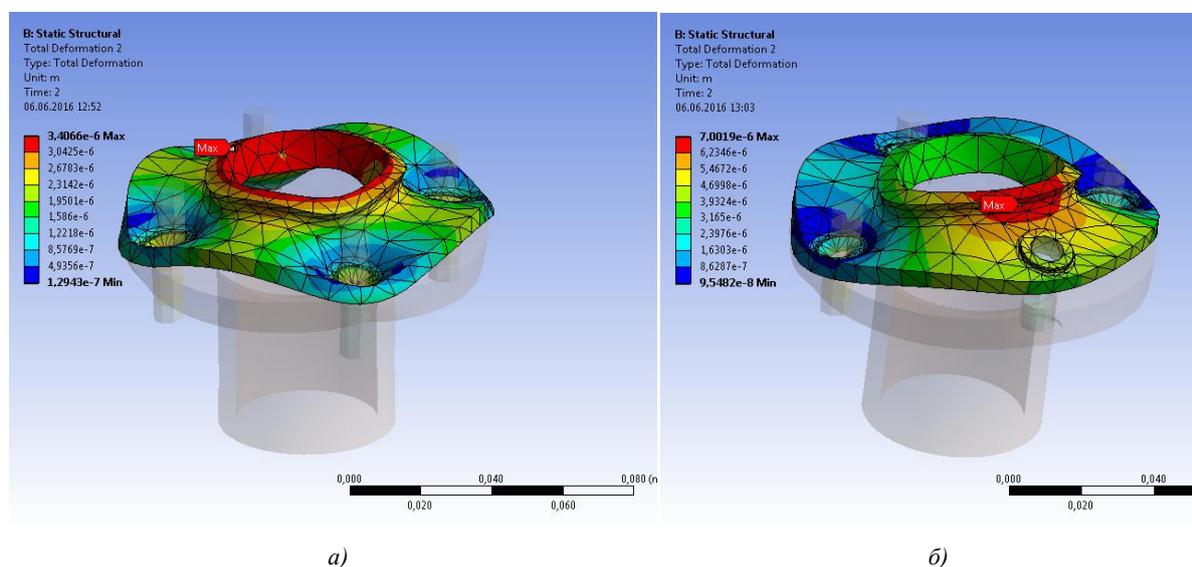


Рис. 5. Общая деформация конструкции с масштабом 2x: а) при ослабленных болтовых соединениях, расположенных друг напротив друга; б) при одном ослабленном болтовом соединении

Модель фланца просчитывается для возможных комбинаций ослабления болтовых соединений. Некоторые варианты расчета:

- три соединения имеют величину усилия 7000 Н, ослаблено одно болтовое соединение до 3000 Н;
- ослаблены два болтовых соединения, расположенные рядом, до 3000 Н;
- ослаблены два болтовых соединения, расположенные друг напротив друга, до 3000 Н;
- ослаблены три болтовых соединения до 3000 Н.

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции проводится статический анализ с двумя шагами нагружения. На первом шаге нагружения задаются ограничения по перемещениям и предварительное натяжение болтов крепления деталей конструкции. На втором шаге нагружения добавляется действие удаленной силы, приложенной к торцу фланца, и учитываются изменения в натяжении болтов крепления.

Результаты вычислений некоторых возможных вариантов зажима болтовых соединений приведены в таблице.

Выходной параметр	Вариант задания усилия предварительной затяжки			
	1	2	3	4
Максимальное перемещение по оси Z, м	3,3804e – 006	3,3649e – 006	3,373e – 006	3,3087e – 006
Координаты точки с максимальным перемещением по оси Z				
По оси X	–1,5034e – 002	–1,5034e – 002	–1,5034e – 002	–1,5034e – 002
По оси Y	1,3191e – 002	1,3191e – 002	1,3191e – 002	1,3191e – 002
По оси Z	2,4997e – 003	2,4997e – 003	2,4997e – 003	2,4997e – 003
Максимальное перемещение по оси X, м	1,6064e – 006	1,588e – 006	1,2514e – 006	1,5754e – 006

Окончание таблицы

Выходной параметр	Вариант задания усилия предварительной затяжки			
	1	2	3	4
Координаты точки с максимальным перемещением по оси X				
По оси X	5,е – 002	5,е – 002	–5,е – 003	5,е – 002
По оси Y	0	0	4,е – 002	0
По оси Z	0	0	7,е – 003	0
Максимальное перемещение по оси Y, м	1,5872e – 006	1,5823e – 006	1,5553e – 006	1,3128e – 006
Координаты точки с максимальным перемещением по оси Y				
По оси X	–1,4051e – 004	–1,4051e – 004	–1,4051e – 004	4,е – 002
По оси Y	4,7361e – 002	4,7361e – 002	4,7361e – 002	–5,е – 003
По оси Z	0	0	0	7,е – 003
Эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа	8,5053e + 007	8,4188e + 007	8,4183e + 007	8,4136e + 007

Полученные наборы решений содержат данные разных размерностей, также точно неизвестны пределы изменения переменных, поэтому предварительно проводится нелинейная нормализация входных данных по формулам (7), (8), а границы интервала нормализации задаются с учетом минимальных и максимальных значений в полученной выборке.

Связи между входными и выходными параметрами являются нелинейными, поэтому необходимо использовать нелинейные функции активации. Изначально количество слоев сети и количество нейронов слоев неизвестно, оно определяется экспериментально. Исходя из общих рекомендаций, представленных в документации по работе с нейронными сетями в пакете Matlab, для решения задачи используем двухслойную нейронную сеть. В качестве функции активации нейроны скрытого слоя применяют функцию гиперболического тангенса, а выходные нейроны – сигмоидальную функцию, ограничивающую выходные значения. Обе функции являются нелинейными, непрерывными функциями, позволяющими нейронной сети моделировать нелинейные связи между входными и выходными нейронами. Первый слой сети содержит четыре нейрона, второй – два. Увеличение количества нейронов в слоях ведет к увеличению затрат на расчет по времени и ресурсам. Оптимальное число нейронов в слоях и количество слоев подбираются экспериментально для конкретной решаемой задачи. Так как в работе исследуется возможность использования нейронных сетей для прогнозирования погрешностей крепления, то принято оставлять полученную на данном этапе конфигурацию сети.

Далее проводится обучение нейронной сети, в ходе которого находятся зависимости между параметрами. Для определения точности сети используется набор контрольных данных, зарезервированный под указанные цели ранее.

После успешного обучения нейронной сети было проведено ее тестирование, позволяющее определить, насколько точно нейронная сеть может вычислять степень прижимного усилия в болтовых соединениях, обладая лишь данными о деформации конструкции. Для этого были взяты пробные значения максимальных смещений конструкции, которые соответствуют уже известным значениям затяжки болтовых соединений.

Тестовый набор нормализованных данных имеет вид

$$[0,022; -1; 0,694; -0,998; 0,385; -0,36; 1; 0,4; 0,5; -0,004; 1; -1],$$

что соответствует варианту конструкции с усилиями предварительной затяжки болтов, равными 7000, 3000, 3000, 7000 Н в четырех болтах соответственно.

В ходе испытания были получены следующие результаты: 7100, 2790, 2802, 6893 Н. Принимая во внимание сложность нахождения нелинейной зависимости по малому количеству

обучающих выборок, полученную погрешность можно считать приемлемой на данном этапе разработки нейронной сети.

5. Анализ модели компрессорно-конденсаторного агрегата

На примере модели ККА исследуем возможность идентификации прижимных усилий в местах крепления генератора к опорной раме конструкции. По аналогии с анализом модели фланца рассчитываем напряженно-деформированные состояния конструкции для вариантов крепления генератора на раме ККА с различной величиной прижимных усилий (рис. 6).

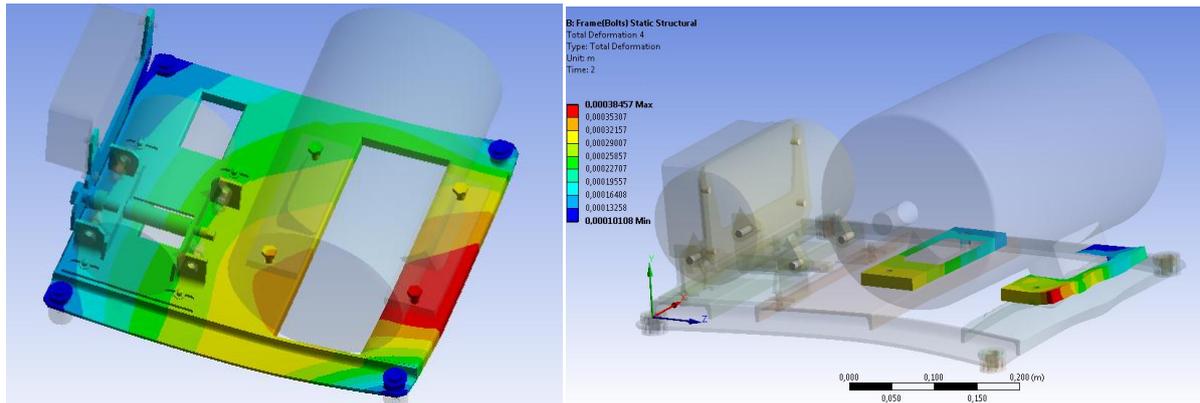


Рис. 6. Вариант деформированного состояния рамы и опор генератора конструкции ККА

При решении прямой задачи о нахождении напряженно-деформированного состояния конструкции в качестве входных данных выступают величины прижимных усилий в местах крепления генератора к опорной раме, в качестве выходных – координаты узла с наибольшим общим перемещением, наибольшими перемещениями по осям X, Y, Z, величины соответствующих смещений. Выходные данные получаем при помощи скрипта APDL. Отметив входные и выходные параметры как «проектные значения параметров», переходим в компонент Parameter Set среды Ansys Workbench, где создаем набор проектных решений с различными вариантами величин прижимных усилий в узлах крепления и выполняем их расчет (рис. 7).

Table of Design Points																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	...	P... Bolt	P... Bolt	P260 - Bolt Pre...	P261 - Bolt Pre...	P... Bolt	P... Bolt	P... Bolt	P... Bolt	P266 - Equiva... Stress 2 Maximum	P272 - m...	P273 - m...	P... m...	P... m...	P269 - my_z	P... m...	P270 - my_stress_z_max
2	Units	N	N	N	N	N	N	N	N	Pa							
4	DP 1	1	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	5,6077E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,721E+08
5	DP 2	8000	1	8000	8000	8000	8000	8000	8000	5,4909E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,7206E+08
6	DP 3	8000	8000	1	8000	8000	8000	8000	8000	7,254E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,9286E+08
7	DP 4	8000	8000	8000	1	8000	8000	8000	8000	7,3678E+07	0,015	0,45654	0,11646	0,015	0,45654	0,11646	5,3296E+08
8	DP 5	8000	8000	8000	8000	1	8000	8000	8000	7,3495E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,9291E+08
9	DP 6	8000	8000	8000	8000	8000	1	8000	8000	7,3685E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,929E+08
10	DP 7	8000	8000	8000	8000	8000	8000	1	8000	7,3584E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,9291E+08
11	DP 8	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	1	7,3376E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,929E+08
12	DP 9	1	1	8000	8000	8000	8000	8000	8000	7,443E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,928E+08
13	DP 10	8000	1	1	8000	8000	8000	8000	8000	7,2238E+07	-0,008	0,016021	0,38449	-0,008	0,016021	0,38449	6,928E+08
14	DP 11	8000	8000	1	1	8000	8000	8000	8000	7,2786E+07	0,015	0,45654	0,11646	0,015	0,45654	0,11646	5,329E+08
15	DP 12	8000	8000	8000	1	1	8000	8000	8000	7,3742E+07	0,015	0,45654	0,11646	0,015	0,45654	0,11646	5,3296E+08

Рис. 7. Часть набора проектных параметров и решений

Полученные наборы решений содержат данные разных размерностей. Пределы изменения переменных неизвестны, поэтому проводим нелинейную нормализацию входных данных, где границы интервала нормализации задаем с учетом минимальных и максимальных значений в полученной выборке.

В пакете MATLAB при помощи инструмента Neural Network Toolbox строим двухслойную однонаправленную нейронную сеть по аналогии с моделью нейронной сети для фланца. Число входов данной сети 12, что включает максимальные величины смещения по осям и координаты соответствующих узлов; число выходов – 4, что соответствует величинам прижимных усилий в четырех узлах крепления. В первом слое, состоящем из четырех нейронов, используется дифференцируемая функция активации гиперболического тангенса TANSIG. Во втором слое, состоящем из двух нейронов, используется логарифмическая сигмовидная функция активации LOGSIG. Последний слой является выходом сети. Для обучения используется функция на основе алгоритма обратного распространения TRAINLM, которая задается по умолчанию (рис. 8).

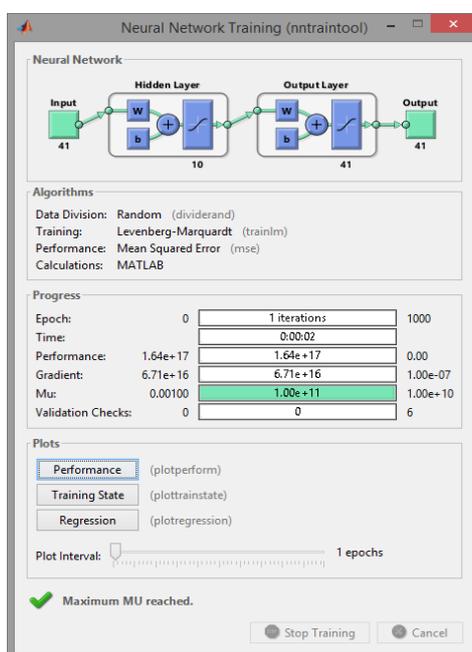


Рис. 8. Обучение нейронной сети в пакете MATLAB

После успешного обучения нейронной сети проведено ее тестирование. Для этого были взяты пробные значения максимальных смещений конструкции, которые соответствуют уже известным значениям затяжки болтовых соединений.

При расчете рамы ККА был получен следующий вектор решений: $[4,0906e - 04; -5,e - 03; 4,9278e - 02; 0,29902; 3,8796e - 05; 0,15833; 3,5e - 02; 0,418; 4,5502e - 05; 0,19429; 2,e - 02; 0,488]$, что соответствует варианту конструкции с усилиями предварительной затяжки болтов, равными 8000, 7000, 8000, 4000 Н в четырех болтах соответственно.

После нормализации входной вектор значений имеет вид $[0,118765515; -0,142689858; 0,483907556; -0,802527495; -0,411459679; 0,338103691; 0,575; 0,35; -0,28310195; 0,4987375; 0,343767308; 0,2]$.

В ходе испытания получены следующие результаты: 7556, 6950, 7400, 4200 Н.

Заключение

Размещение и крепление деталей влияют на распределение напряжений и смещений в несущей конструкции. Погрешности крепления отдельных составляющих конструкции могут привести к деформации деталей и последующей поломке устройства в целом.

Определение напряженно-деформированного состояния модели является прямой задачей механики деформированного тела. Решение обратной задачи идентификации погрешностей крепления конструкции по величинам смещений в узлах соединения отдельных элементов представляет собой восстановление некоторой неизвестной зависимости по имеющимся экспериментальным данным.

Решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния конструкции производится методом конечных элементов посредством пакета конечно-элементных расчетов. В качестве способа решения обратной задачи исследуется возможность использования нейронной сети. Решение обратной задачи предполагает многократное решение прямой задачи. Подготовка обучающей выборки представляет собой ресурсоемкий и долгий процесс, поскольку проведение анализа сложной конечно-элементной модели требует больших аппаратных и временных затрат.

Для уменьшения погрешности предсказываемых результатов необходимо экспериментально подбирать оптимальную конфигурацию нейронной сети отдельно для конкретной решаемой задачи и использовать большой объем выборок для обучения сети и большой объем контрольных данных для ее тестирования.

Использование обученной нейронной сети поможет определить величины прижимного усилия в узлах крепления по перемещениям, возникающим в местах крепления отдельных элементов, что позволит предсказать поведение конструкции в ходе эксплуатации и таким образом предотвратить выход из строя оборудования и избежать аварийной ситуации.

Эффективность предлагаемого подхода демонстрируют полученные результаты. Так, в задаче о прижимных усилиях четырех болтовых соединений фланца покомпонентное сравнение результирующего вектора с тестовым дает следующие относительные погрешности в процентах: [1,42857; -0,33333; -0,66000; -0,1522857].

В задаче идентификации прижимных усилий в местах крепления генератора к опорной раме конструкции ККА сравнение результирующего вектора с тестовым дает следующие относительные погрешности в процентах: [-0,55000; -7,41428; -7,50000; 5,00000]. Отметим, что точность можно повысить, увеличив количество предварительных численных экспериментов на основе конечно-элементной модели.

Список литературы

1. Напрасников, В.В. Влияние упрощающих предположений в конечно-элементных моделях компрессорно-конденсаторных агрегатов на спектр собственных частот / В.В. Напрасников, С.В. Красновская // Системный анализ и прикладная математика. – 2014. – № 1–3. – С. 51–55.
2. Красновская, С.В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 2. – С. 92–99.
3. Напрасников, В.В. Исследование возможных улучшений рамы компрессорно-конденсаторного агрегата / В.В. Напрасников, С.В. Красновская // Восьмая Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в промышленности» (ІТІ*2015) : материалы конф., Минск, 2–3 апреля 2015. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – С. 51–52.
4. Красновская, С.В. Влияние метода извлечения мод на спектр собственных частот рамы компрессорно-конденсаторного агрегата / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Восьмая Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в промышленности» (ІТІ*2015) : материалы конф., Минск, 2–3 апреля 2015. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – С. 53–54.
5. Задача об идентификации прижимного усилия в узле крепления компрессорно-конденсаторной установки / А.В. Красновский [и др.] // Сборник материалов науч.-техн. конф. «Информационные технологии в технических и социально-экономических системах», Минск, 22 апреля 2015 г. – Минск : Республ. ин-т высшей школы, 2015. – С. 83.
6. Ватульян, А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела / А.О. Ватульян. – М. : Физматлит, 2007. – 224 с.

7. Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний : ГОСТ Р 52627–2006. – Введ. 27.12.06. – М. : Стандартинформ, 2007. – 28 с.
8. Иосилевич, Г.Б. Затяжка и стопорение резьбовых соединений : справочник / Г.Б. Иосилевич, Г.Б. Строганов, Ю.В. Шарловский. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
9. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03–85). – Введ. 01.01.93. – М. : ЦНИИпромзданий, 1993. – 49 с.
10. Терехов, С.А. Лекции по теории и приложениям искусственных нейронных сетей / С.А. Терехов. – Снежинск : ВНИИТФ, 1994.
11. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
12. Консультационный центр MATLAB: раздел Neural Network Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/task1/task1.php/>. – Дата доступа : 21.06.2017.

Поступила 29.08.2017

*Белорусский национальный
технический университет,
Минск, пр. Независимости, 65
e-mail: n_v_v@tut.by,
skraspost@gmail.com*

S.V. Krasnovskaya, V.V. Naprasnikov

**DETECTION OF CLAMPING FORCES ON MOUNTING A CONSTRUCTION
VIA NEURAL NETWORK FOR THE FINITE-ELEMENT MODEL
OF COMPRESSOR-CONDENSING UNIT**

The article provides a brief review of a condensing unit and problems of mathematic simulation. It examines the influence of pretension on the strain-stress state of a construction by means of finite-element modeling. The arrangement of a set of input-output data for neural network is also considered. The article investigates a possibility to predict mounting precision via neural networks; by analogy with the above calculations it examines the option to detect clamping forces on mounting compressor-condensing unit.