

Васильев А.Н., Тархов Д.А., Болгов И.П., Каверзнева Т.Т., Колесова С.А., Лазовская Т.В., Шемякина Т.А. Построение нейросетевых моделей процесса растяжения образца из упругого материала. // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XVI Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2016. – С. 84-91.

УДК 004.032.26+519.62

ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РАСТЯЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ИЗ УПРУГОГО МАТЕРИАЛА

А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, И.П. Болгов, Т.Т. Каверзнева,
С.А. Колесова, Т.В. Лазовская, Т.А. Шемякина

THE CONSTRUCTION OF NEURAL NETWORK MODELS OF DEFORMATION PROCESS FOR THE ELASTIC MATERIAL SAMPLE

A.N. Vasilyev, D.A. Tarkhov, I.P. Bolgov, T.T. Kaverzneva,
S.A. Kolesova, T.V. Lazovskaya, T.A. Shemyakina

Аннотация. Рассматриваются подходы к построению многослойных приближённых решений дифференциальных уравнений. Эти подходы основаны на классических приближённых методах. В отличие от классических подходов в результате вычислений получаются не поточечные приближения, а приближённые решения в виде функций. Предложенные методы применяются к построению индивидуальных нейросетевых моделей процесса деформации и разрушения для конкретных образцов (резиновая нить).

Ключевые слова: резиновая нить, деформация, разрушение, образец, нейросетевая модель, дифференциальное уравнение, многослойное приближённое решение.

Abstract. Some approaches to building multi-layered approximate solutions of differential equations are discussed. These approaches are based on classical approximate methods. In contrast to classical approaches, we obtain as the result of the calculation not pointwise approximation, but approximate solutions as functions. The proposed methods are applied to the construction of individual neural network models of deformation and destruction process for the specific samples (rubber thread).

Keywords: rubber thread, deformation, destruction, sample, neural network model, differential equation, multi-layer approximate solution.

Сильно растягивающиеся материалы приобретают все большее значение в связи с их применением в гражданской технике, спорте и обеспечении безопасности. Из подобных материалов изготавливают различные канаты, стропы, шнуры и т. д. [1–5]. Свойства таких объектов зависят от их структуры и используемых материалов и могут быть очень разнообразны.

Целью работы является моделирование динамики и прогноз момента разрыва объекта из упругого материала по динамике процесса его растяжения под нагрузкой. Для построения зависимости удлинения объекта от приложенной силы используются нейронные сети, показавших свою эффективность при решении задач моделирования сложных объектов [6–13]. Нас интересует динамика растяжения конкретного образца из упругого материала в случае, когда закон Гука не выполняется, т.е. существенна нелинейность зависимости удлинения от приложенной силы. Особые сложности возникают при необходимости предсказания момента разрыва по особенностям зависимости удлинения объекта от приложенной силы. Разрушение определяется быстрым разрастанием небольших повреждений объекта (трещин,

неоднородностей, каверн), набор которых для каждого объекта уникален. Желательно проводить диагностику процесса разрушения по динамике объекта. Теоретические модели не позволяют установить подобную связь, так как не учитывают особенностей отдельных образцов.

Нейронная сеть использовалась в работе на трёх этапах. На *первом* проводилась аппроксимация экспериментальной зависимости удлинения от нагрузки персептронном с одним скрытым слоем. На *втором* на основе модели, построенной на первом этапе, строилась многослойная нейросетевая модель динамики удлинения объекта в конкретной задаче. На *третьем* строились нейросетевые зависимости условий разрыва объекта от весов нейронной сети, построенной на первом этапе.

В качестве образцов использовались резиновые нити. Разработанные методы без изменения могут применяться в моделировании процессов растяжения других объектов из упругого материала. Исследования проводились с резинками длины 5 и 8 сантиметров с четырьмя различными скоростями растяжения материала: 50 мм/мин, 250 мм/мин, 500 мм/мин и 1000 мм/мин. На основе опытов были получены графики зависимости удлинения (мм) от приложенной растягивающей силы (Н). По этим графикам удалось установить, что нагрузка, при которой происходит разрыв, практически не зависит от длины образца и скорости нарастания силы натяжения.

Ниже приведены два графика для одного из экспериментов. Результаты других экспериментов похожи. На первом рисунке показаны данные экспериментов и аппроксимирующая их нейросетевая модель, на втором – отклонение нейросетевой модели от экспериментальных данных.

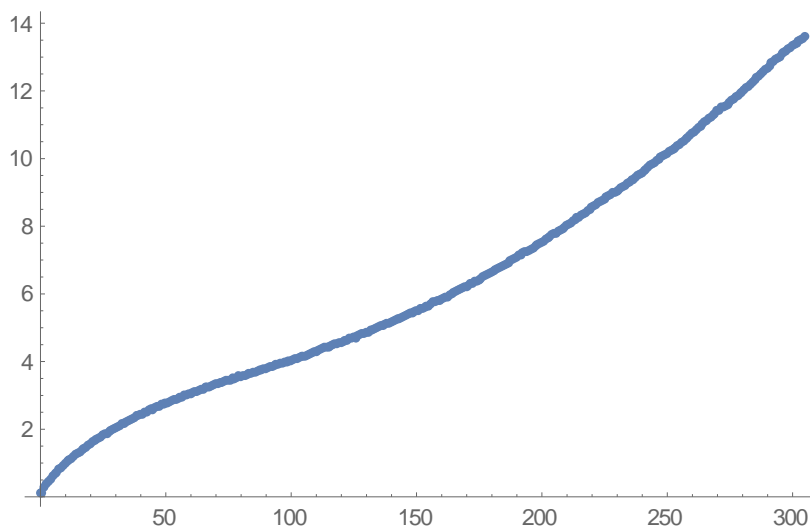


Рис. 1. Экспериментальная зависимость растягивающей силы от удлинения резиновой нити и её нейросетевая аппроксимация для образца длиной 5 см и скорости 500 мм/мин.

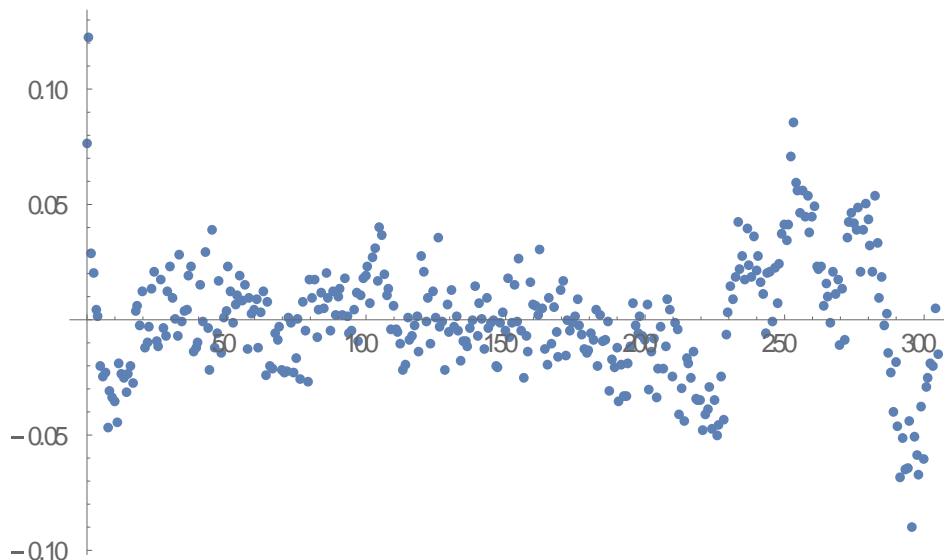


Рис. 2. Ошибка нейросетевой аппроксимации экспериментальной зависимости растягивающей силы от удлинения резиновой нити при длине образца 5 см и скорости 500 мм/мин.

На рис. 1 видно, что при относительно малых растяжениях зависимость существенно нелинейная, что противоречит известному закону Гука. При увеличении растяжения зависимость почти линейная с малыми возмущениями перед разрывом. Отсутствие нелинейного участка перед разрывом существенно затрудняет предсказание значения нагрузки, при которой происходит разрыв.

С помощью нейросетевой зависимости вида $F(x) = c_1 \text{th}[a_1(x - x_{c_1})] + c_2 \text{th}[a_2(x - x_{c_2})]$ удалось достаточно точно аппроксимировать зависимость удлинения от нагрузки. Коэффициенты $a_{1,2}, c_{1,2}$ и $x_{c_{1,2}}$ искались из условия минимума функционала ошибки $\sum_{i=1}^m (F(x_i) - F_i)^2$. Здесь x_i – экспериментальное удлинение образца, а F_i – соответствующая ему растягивающая сила. Минимум искался сочетанием метода RProp и метода облака [7]. Приведём пример нейросетевой аппроксимации зависимости, соответствующей рис. 1 и 2:

$$F(x) = 11.18 \tanh[0.00568(x - 298.66)] + 13.21 \tanh[0.0169(x + 65.88)].$$

Отметим, что для всех экспериментов относительная ошибка нейросетевой аппроксимации не превышала 3%. Видно возрастание ошибки перед моментом разрыва.

Полученную зависимость можно использовать для получения нейросетевой аппроксимации временной зависимости высоты тела, подвешенного на упругой нити. Применяя закон Ньютона и приведённую выше аппроксимацию для зависимости растягивающей силы от удлинения нити, которое соответствует изменению положения тела на вертикальной оси, имеем зависимость $\ddot{x} = G(x) = g - \frac{1}{m} F(x)$. Вводя в качестве дополнительной координаты скорость, можно перейти к двумерной системе первого порядка вида $\dot{y}(t) = g(t, y(t))$. При этом первой координатой вектора $y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$ является x , а второй координатой $-\dot{x}$, соответственно координатами вектора g будут y_2 и $g - \frac{1}{m} F(y_1)$.

Для построения приближения $y(t)$ используем многослойную рекуррентную функциональную аппроксимацию. Если применить метод Эйлера с n шагами для интегрирования данного уравнения на промежутке с переменным верхним пределом $[0, t]$, при равномерном разбиении интервала получаем рекуррентную формулу вида

$$y_{k+1}(t) = y_k(t) + \frac{t}{n} g\left(k \frac{t}{n}, y_k(t)\right), \quad (1)$$

при этом $y_0(t) = y_0$ определяется начальными условиями. Искомая зависимость $x(t)$ представляется первой координатой вектор-функции $y_n(t)$. Сила g определена нейросетевой аппроксимацией. Из формулы (1) следует, что $y_n(t)$ является выходом персептрона с n скрытыми слоями.

На третьем этапе была построена нейросетевая модель зависимости разрушающей силы (силы натяжения, при которой происходит разрыв) отвесов, полученных на первом этапе нейросетевых аппроксимаций. При этом веса этих нейросетевых аппроксимаций различаются от образца к образцу и в сжатом виде представляют его поведение под нагрузкой. Ввиду небольшого числа протестированных образцов (22 образца) построение сложной зависимости на этом этапе нецелесообразно. В связи с этим были построены простейшие нейросетевые зависимости вида $c \cdot th[a(x - x_c)]$. Для определения их весов использовался такой же, как и ранее, функционал ошибки и такие же алгоритмы нелинейной оптимизации, как и на первом этапе. Ниже приведена одна из полученных зависимостей.

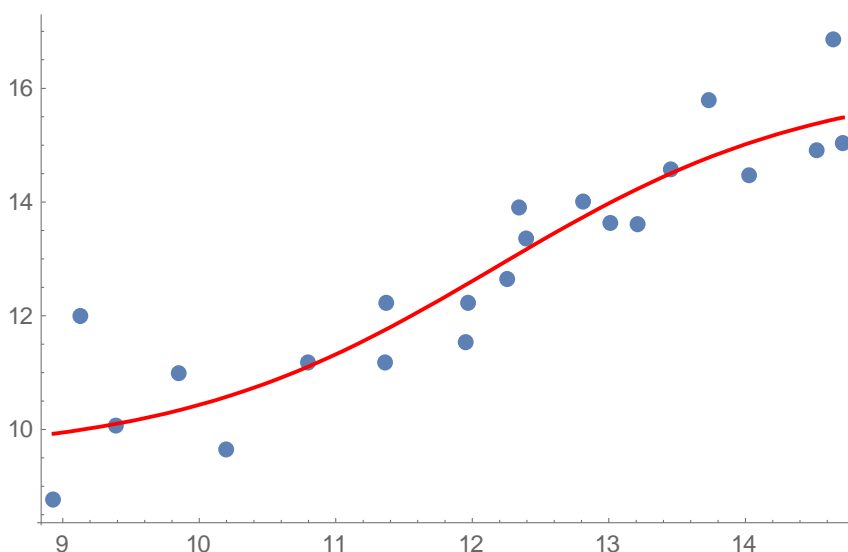


Рис. 3. Зависимость растягивающей силы, при которой происходит разрыв резиновой нити, от параметра c_1 нейросетевой аппроксимации зависимости удлинения от растягивающей силы

Учитывая сильное влияние на момент разрыва дефектов конкретного образца, полученный результат можно считать удовлетворительным. Зная поведение образца на начальном участке нагружения, можно предугадать предельную силу и удлинение, при котором произойдет разрыв.

Рассмотренный подход можно применить в строительной отрасли при обосновании выбора спасательных тросов, используемых при проведении строительных работ методом промышленного альпинизма, при расчете риска при эвакуации людей методом «прыжка на тент» [1].

Библиографический список

1. Каверзнева Т.Т., Мазуренко К.С. Контроль безопасности при проведении работ на высоте // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции/ Институт военно-технического образования и безопасности СПбПУ. СПбПУ: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 48 с. (С. 187–190).
2. Hearle JWS. One-dimensional textiles. Handbook of Technical Textiles. Elsevier; 2016. 345-360 p.
3. McKenna HA, Hearle JWS, O’Hear N. Handbook of Fibre Rope Technology. Handbook of Fibre Rope Technology. Elsevier; 2004. 1-34 p.
4. Weller SD, Johanning L, Davies P, Banfield SJ. Synthetic mooring ropes for marine renewable energy applications. Renew Energy. 2015 Nov; 83:1268–78.
5. McLaren, A.J. (2006) Design and performance of ropes for climbing and sailing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 220 (1). pp. 1-12.
6. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 528с.
7. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Нейросетевой подход к задачам математической физики. СПб.: Нестор-История, 2015. 260 с.
8. Тархов Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2014. 348 с.
9. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Нейросетевая модель решения задачи о катализаторе. Гибридный метод // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XIV Междунар. научно-техн. конф. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. С. 58–62.
10. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Модель неизометрического химического реактора на основе параметрических нейронных сетей // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XV Междунар. научно-техн. конф. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2015. С. 96–99.
11. Васильев А.Н., Лазовская Т.В., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Нейросетевой подход к решению сложных задач для обыкновенных дифференциальных уравнений // XVIII Междунар. научно-техн. конф. «Нейроинформатика-2016»: сб. науч. тр. Ч.3. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 52–61.
12. Budkina E.M., Kuznetsov E.B., Lazovskaya T.V., Leonov S.S., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Neural Network Technique in Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations// Springer International Publishing Switzerland 2016 L. Cheng et al. (Eds.): ISNN 2016, LNCS 9719. pp. 277–283, 2016.
13. Gorbachenko V.I., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Zhukov M.V. Neural Network Technique in Some Inverse Problems of Mathematical Physics// Springer International Publishing Switzerland 2016 L. Cheng et al. (Eds.): ISNN 2016, LNCS 9719. pp. 320–316, 2016.

Васильев Александр Николаевич
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.n.vasilyev@gmail.com

Тархов Дмитрий Альбертович
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dtarkhov@gmail.com

Болгов Иван Павлович
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: boliv96@gmail.com

Каверзнева Татьяна Тимофеевна
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kaverztt@mail.ru

Колесова Светлана Алексеевна
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: svetakolesova@mail.ru

Лазовская Татьяна Валерьевна
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tatianala@list.ru

Шемякина Татьяна Алексеевна
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sh_tat@mail.ru

Vasilyev A.N.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Tarkhov D.A.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Bolgov I.P.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Kaverzneva T.T.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Kolesova S.A.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Lazovskaya T.V.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

Shemyakina T.A.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia
