

УДК 621.891
DOI: 10.12737/20285

Е.В. Лемешева, П.В. Тихомиров, А.М. Атрощенко, Н.А. Булхов, М.А. Измеров

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Представлена методика оценки контактной жесткости с помощью нейрокомпьютерного моделирования, позволяющего учесть параметры качества поверхностного слоя. С целью снижения количества входных параметров выполнена замена контактного взаимодействия шероховатых и волнистых поверхностей на контакт гладкого тела с по-

верхностью, имеющей эквивалентные параметры качества. Получены математические модели для контактной жесткости.

Ключевые слова: контактная жесткость, стык поверхностей, уравнение регрессии, нейрокомпьютерное моделирование, параметры качества поверхности.

E.V. Lemesheva, P.V. Tikhomirov, A.M. Atroshchenko, N.A. Bulkhov, M.A. Izmerov

NEUROCOMPUTER MODELING OF CONTACT RIGIDITY

Contact rigidity of a joint is one of the main criteria of operability of forest cars. It defines vibration activity and durability of the tightened bolted connections therefore its assessment will allow to predict behavior of technical systems. In work the technique of an assessment of contact rigidity by means of the neurocomputer modeling allowing to consider parameters of quality of a blanket is presented. Results of researches allowed to receive mathematical models for contact rigidity.

In the paper there is presented a procedure of contact rigidity estimate with the aid of neurocomputer

Введение

Контактная жесткость стыка поверхностей является очень важным критерием, описывающим состояние технической системы, и зависит от множества факторов, которые характеризуют качество поверхности сопряженных деталей. Расчеты при конструировании с учетом одного из основных критериев работоспособности - контактной жесткости пока не разработаны [1]. Результаты исследований контактной жесткости [2; 3] носят частный характер, так как они не в полной мере учитывают многообразие параметров качества поверхностного слоя сопряженных деталей и их влияние на контактную жесткость со-

modeling. A contact rigidity of a joint is one of the basic criteria of machine and mechanism capacity for work. It defines vibration activity and strength of tightened bolted connections therefore its estimate will allow forecasting the behavior of technical systems. Neurocomputer modeling is a promising method allowing taking into account quality parameters of a surface layer of machinery at the analysis of a deformed state.

Key words: contact rigidity, joint of surfaces, regression equation, neurocomputer modeling, parameters of quality of a surface.

единений.

Перспективным является подход, использующий методику нейрокомпьютерного моделирования [4; 5]. Исходными данными для такого анализа являются параметры, полученные с помощью автоматизированной системы. Данная система определяет параметры как шероховатости, так и волнистости. Дополнительными параметрами, характеризующими поверхность, были радиусы закругления вершин выступов и волн и высота сглаживания шероховатости. Измерения параметров проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Теоретические основы

Построение модели начинают с графического построения нейронов, слоёв и связей. Используем модель двухслойного перцептрона (без учета входной и выходной информации) с

сигмоидальной функцией активации (рис. 1). Здесь $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ - входные данные (параметры качества поверхности); $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m$ - выходные данные (контактная жесткость). С учётом

исходных данных n (число строк в таблицах) в первом и втором скрытых слоях будет по n нейронов.

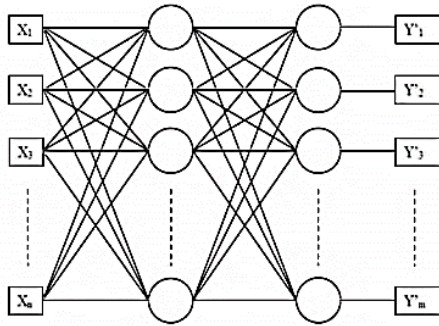


Рис. 1. Архитектура нейросети

Схема простого нейрона представлена на рис. 2. Здесь $S = \sum X_i W_i$, где W_i – весовые коэффициенты; X_i – входные данные; F – функция активации; выходной сигнал $Y_i = \text{OUT} = F(S)$. Для многослойного персептрона получаем следующее выражение:

$$s_{jl} = \sum_i v_i$$

где i – номер входного сигнала; j – номер нейрона в слое; l – номер слоя.

Выберем для решения задачи определенную функцию активации и подготовим данные для подачи на вход. Линейное преобразование не способно масштабировать основной массив данных и одновременно ограничить диапазон возможных значений этих данных. Естественный выход из этой ситуации – использовать для предварительной обработки данных функцию активации тех же нейронов. Нелинейное преобразование нормирует основной массив данных, одновременно гарантируя, что $\tilde{X}_i \in [0, 1]$.

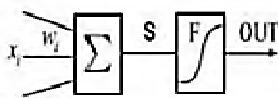


Рис. 2. Схема нейрона

Далее выбирают начальные значения весовых коэффициентов. Выбранные значения должны лежать в рабочей

области функции активации. Для этого назначим случайным образом начальные значения из области $(-\frac{1}{2k}, \frac{1}{2k})$, где

k – число нейронов в том слое, из которого выходит данный синапс (в модели $k = n$). После обработки данные можно вводить в спроектированную нейронную сеть. При попадании на вход данные суммируются и проходят через функцию активации. Гладкость и непрерывность этой функции – её важные положительные качества. Данная функция симметрична относительно точки ($S=0, \text{OUT}=1/2$). Это делает равноправными значения $\text{OUT}=0$ и $\text{OUT}=1$, что существенно для работы сети.

После предварительных этапов следует начать обучение. Суммарные выходные значения и являются моделируемыми показателями Y . В ряде случаев следует выполнить корректировку весовых коэффициентов, для чего используют метод обратного распространения ошибки. Для коррекции потребуется частные значения E : $E_r = (Y_r - Y_r')^2/2$.

По алгоритму обратного распространения ошибки весовые коэффициенты рассчитываются так:

$$\Delta W_{ijl} = -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial W_{ijl}}; W'_{ijl} = W_{ijl} + \Delta W_{ijl}.$$

Здесь W'_{ijl} – значение веса на следующем шаге обучения; W_{ijl} – значение веса на данном шаге; ε – скорость обучения. Значение производной рассчитывается для текущих значений параметров W на данном шаге. Обучение происходит до тех пор, пока величина не достигнет приемлемого значения. Обучение проводят на примерах, количество которых составляет 80 % от общего количества экспериментальных данных. Вводя прогностические значения факторов (примеры из оставшихся 20 %), можно получить соответствующие им прогнозные значения показателей и их сравнение с экспериментом.

Геометрические параметры качества поверхности

Параметры шероховатости (определяются в соответствии с ГОСТ

2789-73): Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Rz – высота

неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} – наибольшая высота профиля; S_m – средний шаг неровностей; S – средний шаг местных выступов профиля; t_p – относительная опорная длина профиля, где p – значения уровня сечения профиля.

Параметры волнистости поверхности. Волнистость оценивают двумя параметрами: высотой волнистости W_z и шагом волнистости S_w .

Высота волнистости W_z – это среднее арифметическое из пяти ее значений, определенных на длине участка измерения L_w (рис. 3 а). Средний шаг волнистости S_w – среднее значение расстояний S_{wi} между одноименными сторонами соседних волн, измеренных по средней линии профиля (рис. 3 б). Положение средней линии определяется так же, как и положение средней линии профиля шероховатости. Указанные параметры шероховатости и

волнистости были использованы при оценке качества поверхностей (табл. 1) и контактной жесткости. Физико-механические свойства исследуемых поверхностей были приняты одинаковыми (твердость стальных сопряженных поверхностей составляла 300 НВ).

Задача исследования заключалась в установлении связи параметров шероховатости и волнистости с функциональным назначением данного сочетания поверхностей.

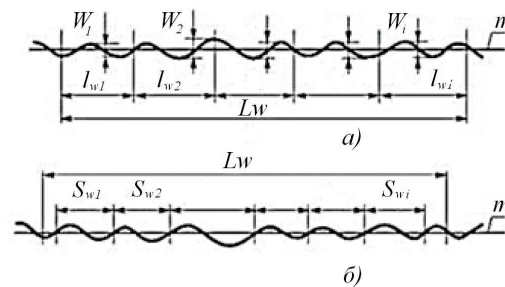


Рис. 3. Определение высоты (а) и шага (б) волнистости

Формирование нейросети

Параметры измерялись с помощью автоматизированной системы [6].

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры шероховатости и волнистости (мкм)

№ образца	Направление ОХ					Направление ОУ				
	Шероховатость			Волнистость		Шероховатость			Волнистость	
	R_a	R_p	r	r_w	W_z	R_a	R_p	r	r_w	W_z
1	1,94	6,82	64	3080	3,4	0,61	3,11	98	4590	3,4
2	1,51	6,41	64	3680	7,9	0,61	2,41	294	5780	3,0
3	2,30	7,82	35	7540	8,9	0,49	2,73	310	7640	9,1
4	2,15	6,30	50	8980	8,2	0,82	2,78	72	5680	2,9
5	1,59	5,01	114	3600	8,5	0,88	3,06	230	3600	4,0
6	1,57	4,74	55	6170	8,4	0,68	2,91	96	4950	3,3
7	1,25	5,05	29	5830	7,6	0,90	2,83	704	3700	4,6
8	1,91	7,14	33	9830	8,6	0,86	2,65	279	3840	2,9
9	1,50	2,83	30	3510	5,7	0,88	1,38	165	5470	3,7
10	1,37	3,82	28	2670	7,3	0,45	2,11	55	2910	3,9
11	0,64	2,76	59	6290	3,6	0,35	1,57	131	2460	8,2
12	0,92	2,15	26	3000	6,6	0,76	1,69	310	3630	3,4
13	0,78	2,68	37	2190	3,0	0,36	1,18	44	3560	6,0
14	0,75	2,98	34	2590	4,9	0,31	1,86	146	7050	2,2
15	0,82	3,41	96	3970	7,8	0,56	1,92	108	3180	8,5
16	0,89	3,46	51	3180	4,0	0,45	1,23	242	3480	1,6
17	1,32	3,41	54	3740	6,0	0,58	1,37	499	6440	4,8
18	1,30	4,51	37	4360	7,4	0,61	1,85	67	4200	4,5
19	1,31	3,89	68	4430	5,2	0,83	1,63	328	5010	5,6
20	1,20	1,27	40	3700	9,1	0,36	1,81	45	3600	9,0

Для формирования нейрокompьютерной сети необходимо знать минимальные и максимальные

значения входных факторов, в пределах которых возможно их варьирование (табл. 2).

Таблица 2

Диапазон изменения факторов (мкм)

Фактор	Направление ОХ		Направление ОУ	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
R_a	0,64	2,30	0,31	0,90
R_p	1,27	7,82	1,23	3,11
r_w	2190	9830	2460	7640
W_z	3,0	9,1	2,2	9,1

Для формирования нейросети в качестве примеров были взяты экспериментальные данные контактной

жесткости для разных сочетаний образцов при первом нагружении (табл. 3).

Таблица 3

Формирование нейрокомпьютерной сети

Сочетание образцов	Номинальное давление, МПа				
	3	6	9	12	15
	Контактная жесткость, МПа/мкм				
4/14	2,5	2,5	2,5	2,8	2,5
8/9	1,8	1,2	1,4	1,7	1,8
3/11	1,4	1,5	2,1	2,6	2,6
12/20	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2
18/19	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3
1/7	1,0	1,4	1,4	1,5	1,7
2/13	0,7	1,0	1,2	1,4	1,4
15/16	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3

В соответствии с данными табл. 1 в качестве входных факторов и с учетом направления трассы измерения шероховатости и волнистости имеем для одного сочетания образцов 20 факторов. Интерес представляет сокращение числа факторов без существенной потери полезной информации о топографии поверхностей.

На рис. 4 представлена зависимость контактной жесткости от давления,

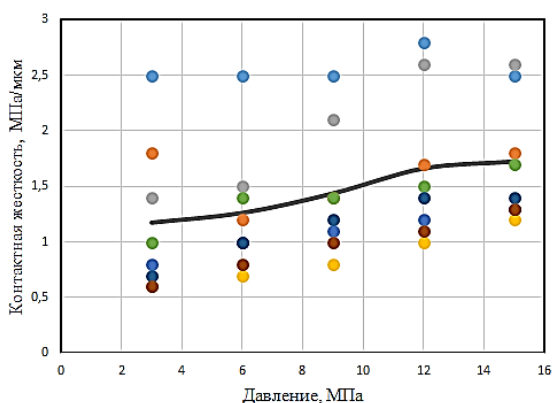


Рис. 4. Зависимость контактной жесткости от давления

построенная на основе данных табл. 3. Как видно из рис. 4, изменение исходных данных по геометрическим параметрам приводит к разбросу выходных данных (контактной жесткости). Сплошная линия на этом рисунке проведена по средним данным. Предварительно можно сделать вывод о том, что в среднем (для данного набора сочетаний) величина контактной жесткости остается практически постоянной. Тем не менее важно учесть и оценить наблюдаемый разброс значений контактной жесткости. С этой целью введем контактную жесткость в качестве дополнительного фактора к эффективным параметрам топографии поверхностей стыка.

Формирование новой нейросети с 4 входными факторами позволяет оценить, насколько корректно введение эффективных параметров топографии сопряженных поверхностей. Для этого сравним результаты, полученные при

тестировании сети с 8 входными факторами (табл. 4) и новой сети с 4

входными факторами.

Параметры приведенной поверхности

Прежде всего выделим те факторы, которые находятся между собой в сильной функциональной связи. Такими факторами являются R_a и R_p . Анализ взятых из табл. 1 данных (40 пар значений) позволил установить коэффициент корреляции, равный $r_{R_a, R_p} = 0,866$. Связь между высотой сглаживания и средним

арифметическим отклонением профиля выражается уравнением регрессии

$$R_p = 0,379 + 2,907R_a.$$

Таким образом, в качестве входного фактора используем только параметр R_a .

Приведенные параметры R_{av} и W_{zv} определяются выражениями [8]

$$R_{av} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{R_{ax}^2 + R_{ay}^2}; W_{zv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{W_{zx}^2 + W_{zy}^2}$$

Приведенные радиусы закругления вершин неровностей и волн равны:

$$r_V = \sqrt{r_x r_y}; r_{wV} = \sqrt{r_{wx} r_{wy}}$$

Подобные преобразования позволяют сократить число входных факторов до 8: для каждой из контактирующих

поверхностей - $R_{av}, r_V, r_{wV}, W_{zv}$. Тогда сочетания образцов (табл. 3) выразим через факторы шероховатости и волнистости (табл. 4).

Таблица 4

Приведенные факторы шероховатости и волнистости (мкм)

Сочетание образцов	Факторы образца				Факторы контртела			
	R_{av}	r_V	r_{wV}	W_{zv}	R_{av}	r_V	r_{wV}	W_{zv}
4/14	1,62	60	7141	6,15	0,57	70	4273	3,80
8/9	1,48	100	6144	6,42	1,23	70	4382	4,80
3/11	1,66	104	7590	9,00	0,52	88	3934	6,33
12/20	0,84	90	3286	5,25	0,89	42	3650	9,05
18/19	0,56	50	4279	6,12	1,10	149	4711	5,40
1/7	1,44	79	3760	3,40	1,09	143	4644	6,28
2/13	1,15	137	4612	5,95	0,61	40	2792	4,74
15/16	0,70	102	3553	8,16	0,70	111	3327	3,05

Используя табл. 3 и 4, выполним формирование нейросети [4]. Фрагмент обучения сети представлен на рис. 5. Данные, полученные с помощью сформированной сети, сравнивались с имеющимися экспериментальными

результатами. С этой целью вводились исходные данные (табл. 5) и с помощью сформированной сети проводилось тестирование. Результаты тестирования приведены в табл. 6.

Таблица 5

Данные для теста(мкм)

Сочетание образцов	Факторы образца				Факторы контртела			
	R_{av}	r_V	r_{wV}	W_{zv}	R_{av}	r_V	r_{wV}	W_{zv}
5/6	1,28	162	3600	6,64	1,21	73	5526	6,38
10/17	1,02	39	2787	5,85	1,02	164	4908	5,43

Таблица 6

Контактная жесткость: результаты тестирования(МПа/мкм)

Сочетание образцов	Контактное давление, МПа				
	3	6	9	12	15
5/6	0,67/1,66	0,80/1,36	0,95/1,34	1,13/1,60	1,26/1,85
10/17	0,84/1,07	1,11/1,54	1,22/1,70	1,24/1,94	1,49/2,03

Примечание. В числителе - данные нейросети, в знаменателе – эксперимент.

Рис. 5. Фрагмент обучения нейросети с 8 входами и 5 выходами (обучение проводилось на 8 примерах)

Качество формирования сети оценим посредством коэффициента корреляции – тесноты связи между экспериментальными данными и величинами, полученными путём нейрокомпьютерного моделирования. Так, на основании табл. 6 имеем для сочетания 5/6 коэффициент корреляции $r_{5/6}=0,482$, а для сочетания 10/17 – 0,954.

Проверим статистическую значимость выборочного коэффициента корреляции для сочетания 5/6. Используем t-критерий Стьюдента при числе пар $n=5$:

$$t = \frac{0,482\sqrt{5-2}}{\sqrt{1-0,482^2}} = 0,953.$$

При числе степеней свободы $f = n - 2 = 3$ и уровне значимости 0,05 имеем критическое (табличное) значение критерия

$$t_{кр} = t_{0,05;3} = 3,18.$$

Так как $t < t_{кр}$, то для этого сочетания отсутствует статистически значимая связь. В других случаях наблюдается сильная связь. Все это свидетельствует о необходимости проведения обучения сети на дополнительных примерах.

Приведение двух взаимодействующих поверхностей к контакту гладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективные показатели качества

При решении многих задач контактной механики выполняют замену контакта сопряженных шероховатых и волнистых поверхностей на контакт

гладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективные показатели качества (рис. 6).

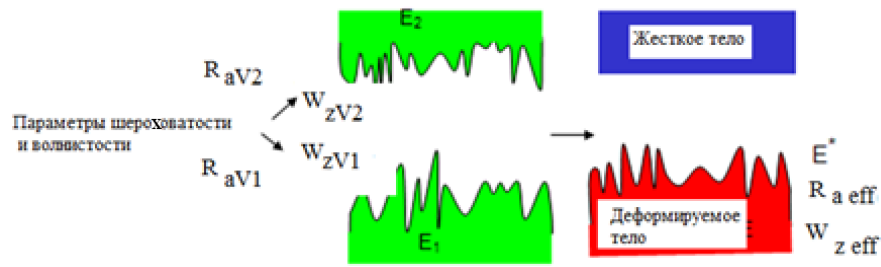


Рис. 6. Приведение двух взаимодействующих поверхностей к контакту гладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективные показатели качества

Физико-механические свойства деформируемого тела с эффективными показателями качества поверхности определяются выражением

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}.$$

Здесь $\mu_{1,2}$ коэффициенты Пуассона материалов взаимодействующих поверхностей; $E_{1,2}$ модули упругости [7].

Сформированная ранее нейросеть имеет 8 входных факторов. Эта сеть не дает возможности определить аналитическую зависимость контактной жесткости от всех влияющих факторов. Сокращение числа факторов и получение эффективных параметров возможно при использовании ранее полученных результатов.

Параметры эффективной поверхности:

- среднее арифметическое

отклонение $R_{a\text{eff}} = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$;

- радиус закругления вершин

выступов $r_{\text{eff}} = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$;

- радиус волны $r_{\text{weff}} = r_{w1} r_{w2} / (r_{w1} + r_{w2})$;

- высота волны $W_{z\text{eff}} = \sqrt{W_{z1}^2 + W_{z2}^2}$.

Теперь можно снова сформировать нейросеть с 4 входами и одним выходом (возьмем данные жесткости для давления 9 МПа).

В табл. 7 представлено сравнение данных, полученных экспериментально и с помощью нейрокомпьютерного моделирования. Наибольшее отклонение составило 50 % - для сочетания 4/14. Для других сочетаний расчет и эксперимент находятся в удовлетворительном соответствии. Изменяя значение какого-либо фактора при фиксированных величинах остальных факторов, можно количественно оценить влияние рассматриваемого фактора на контактную жесткость. К недостаткам такого подхода следует отнести: 1) ограничение областей сканирования факторов; 2) невозможность выявить математическую модель и проверить ее адекватность.

Таблица 7

Обучение сети

Процедура	Сочетание образцов	Входные параметры, мкм				Выходные данные - жесткость (МПа/мкм) при номинальном давлении (МПа)		
		$R_{a\text{eff}}$	r_{eff}	r_{weff}	$W_{z\text{eff}}$	3	9	15
Обучение (примеры)	5/6	1,76	50	2180	9,21	1,7	1,3	1,8
	15/16	0,99	53	1718	8,71	0,6	1,05/1,0	1,3
	4/14	1,72	32	2674	7,23	2,5	1,25/2,5	2,5
	8/9	2,18	41	2558	8,02	1,8	1,4	1,8
	2/13	1,30	31	1739	7,61	0,7	1,0/1,2	1,4
	12/20	1,22	29	1729	10,46	0,6	1,05/0,8	1,2
	18/19	1,23	37	2242	8,16	0,8	1,1/1,1	1,3
	1/7	1,81	51	2078	7,14	1,0	1,13/1,4	1,7
Обучение (тест)	3/11	1,74	48	2591	11,00	-	1,33 /2,1	-
	10/17	1,44	32	1778	7,98	-	1,05 /1,7	-

Примечание. В числителе - данные нейрокомпьютерного моделирования, а в знаменателе –результаты эксперимента.

Рассмотрим другую задачу, связанную с получением регрессионной модели.

Уравнение регрессии

Уравнение регрессии связывает выходной параметр - контактную жесткость - с факторами качества сопряженных поверхностей и контактным давлением. Предварительно выберем уравнение регрессии в виде

$$\ln Y = \ln C + \alpha \ln(X1) + \beta \ln(X2) + \gamma \ln(X3) + \delta \ln(X4) + \varepsilon \ln(X5).$$

Найдем коэффициенты множественной регрессии ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и ε)

$$Y = C(X1)^\alpha (X2)^\beta (X3)^\gamma (X4)^\delta (X5)^\varepsilon.$$

Здесь $X1 = R_{a\text{eff}}$; $X2 = r_{\text{eff}}$; $X3 = r_{w\text{eff}}$; $X4 = W_{z\text{eff}}$; $X5 = p$ (контактное давление).

Прологарифмировав уравнение регрессии, запишем:

матричным способом. Для этого составим таблицу исходных данных (табл. 8).

Таблица 8

Исходные данные

Сочетание образцов	Вход					Выход ($\ln Y$)
	$\ln(X1)$	$\ln(X2)$	$\ln(X3)$	$\ln(X4)$	$\ln(X5)$	
5/6	0,56	3,91	7,69	2,22	1,09	0,531
15/16	-0,01	3,97	7,45	2,15	2,19	0,262
4/14	0,54	3,46	7,89	1,98	2,71	0,916
18/19	0,21	3,61	7,71	2,09	1,09	-0,223
1/7	0,59	3,93	7,64	1,96	2,19	0,336

Представим экспериментальные данные и коэффициенты модели в матричной форме:

$$\ln Y = \begin{pmatrix} 0,53 \\ 0 \\ 0,92 \\ -0,22 \\ 0,34 \end{pmatrix}; \ln X = \begin{bmatrix} 1 & 0,56 & 3,91 & \dots & 1,09 \\ 1 & -0,01 & 3,97 & \dots & 2,19 \\ 1 & 0,54 & 3,46 & \dots & 2,71 \\ 1 & 0,21 & 3,61 & \dots & 1,09 \\ 1 & 0,59 & 3,93 & \dots & 2,19 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты в уравнении регрессии найдем из решения матричного уравнения

$$B = (X^{*T} X^*)^{-1} X^{*T} Y^*.$$

Здесь $X^* = \ln X$; $Y^* = \ln Y$; $B = (\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon)$

Решение матричного уравнения дает

$$B = (3,596; 1,693; 0,087; -0,646; 0,998; 0,520)^T$$

Тогда

$$\ln Y = \ln 3,596 + (\ln R_{a\text{eff}})^{1,693} + (\ln r_{\text{eff}})^{0,087} + (\ln r_{w\text{eff}})^{-0,646} + (\ln W_{z\text{eff}})^{0,998} + (\ln p)^{0,52}.$$

Потенцируя, запишем:

$$Y = K_N = 3,596 (R_{a\text{eff}})^{1,693} (r_{\text{eff}})^{0,087} (r_{w\text{eff}})^{-0,646} (W_{z\text{eff}})^{0,998} (p)^{0,52}.$$

Таблица 9

Сравнение данных расчета и эксперимента

Сочетание образцов	Вход					Выход (Y/Y_x)
	$R_{a\text{eff}}$	r_{eff}	$r_{w\text{eff}}$	$W_{z\text{eff}}$	$P, \text{ МПа}$	
5/6	1,76	50	2180	9,21	3	1,70/1,49
15/16	0,99	53	1718	8,71	9	1,05/1,10
4/14	1,72	32	2674	7,23	15	2,50/2,15
18/19	1,23	37	2242	8,16	3	0,80/0,68
8/9	2,18	41	2558	8,02	3	1,80/1,83
2/13	1,30	31	1739	7,61	9	1,00/1,44
10/17	1,44	32	1778	7,98	9	1,05/1,78

Примечание. Y_x – расчет по полученной формуле.

Максимальное отклонение (сочетание 1/7) составило 58 %.

Проверим адекватность уравнения, используя критерий Фишера

$$S_{аа}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^n (y_j - y_{pj})^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2.$$

Здесь y_{pi} расчетное значение величины Y , вычисленное по уравнению регрессии при подстановке в него значений X_j ; n - число опытов; k - количество коэффициентов в уравнении регрессии; $n - k = f$ - число степеней

$$S_{аа}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^n (y_j - y_{pj})^2 = \frac{1}{7-6} [(1,7 - 1,49)^2 + \dots + (1,0 - 1,78)^2] = 0,911;$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 = \frac{1}{7-1} [(1,7 - 1,414)^2 + \dots + (1,05 - 1,414)^2] = 0,371;$$

$$\bar{y} = \frac{9,9}{7} = 1,414$$

Фактическое значение критерия Фишера $F_p = 0,911/0,371 = 2,456$. Критическое значение $F_{табл}(0,05; 1; 6) = 5,987$. Так как $F_{табл}(0,05; 1; 6) > F_p$, то модель считается адекватной.

Проверку значимости коэффициентов в уравнении регрессии проведем с помощью t -критерия Стьюдента. Доверительный интервал для j -го коэффициента найдем по формуле

$$\Delta B_j = tS(y) / \sqrt{n}.$$

Здесь t - квантиль распределения Стьюдента при числе степеней свободы $f = n - 1 = 6$, равный 2,45. Тогда

$\Delta B_j = 2,45 \sqrt{0,371 / \sqrt{7}} = 0,564$. В данном случае все коэффициенты значимы, кроме коэффициента при радиусе закругления вершин неровностей и давления.

Оценка парных коэффициентов корреляции подтверждает полученный результат:

$$F = \frac{S_{аа}^2}{S_y^2}.$$

Оценку дисперсий $S_{аа}^2$ и S_y^2 выполняют по формулам [9]

свободы; \bar{y} - среднее арифметическое значение выходного параметра.

Для проверки адекватности используем данные табл. 9. При расчете приняты $n = 7$; $k = 6$. Тогда

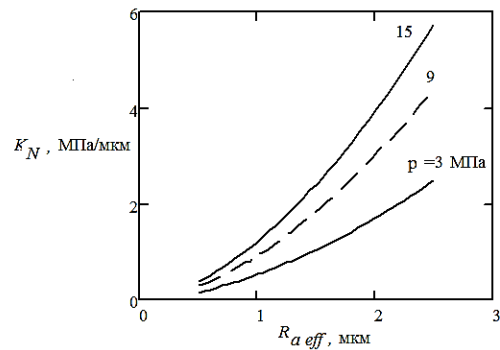


Рис. 7. Зависимости контактной жесткости K_N от эффективного значения среднего арифметического отклонения профиля $R_{a\text{eff}}$ при различных величинах контактного давления (при постоянных $r_{\text{eff}} = 50$ мкм, $r_{w\text{eff}} = 2000$ мкм, $W_{z\text{eff}} = 8$ мкм)

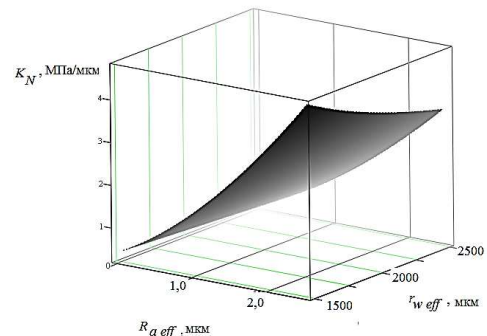


Рис. 8. Зависимость контактной жесткости от среднего арифметического отклонения профиля $R_{a\text{eff}}$ и радиуса волны $r_{w\text{eff}}$

$$r_{(R_{aeff}, y)} = 0,738;$$

$$r_{(r_{iff}, y)} = 0,031;$$

$$r_{(r_{weff}, y)} = 0,723;$$

$$r_{(W_{zeff}, y)} = -0,216;$$

$$r_{(p, y)} = 0,147.$$

На рис. 7 приведены зависимости контактной жесткости K_N от эффективного значения среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} при разных

Выводы:

1. Формирование нейросети позволило установить в неявном виде связь контактной жесткости с 10 геометрическими параметрами качества сопряженных поверхностей во взаимно перпендикулярных направлениях, учитывающих шероховатость и волнистость.

2. С целью снижения количества входных параметров выполнена замена контактного взаимодействия шероховатых и волнистых поверхностей на контакт гладкого тела с поверхностью, имеющей

величинах контактного давления.

На рис. 8 представлена зависимость контактной жесткости от среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} и радиуса волны r_{weff} (при постоянных $r_{eff} = 50$ мкм, $W_{zeff} = 8$ мкм и $p = 9$ МПа).

Таким образом, на основании полученных результатов можно установить влияние параметров качества на контактную жесткость стыка.

эквивалентные параметры качества. Адекватность замены подтверждается результатами нейрокомпьютерного моделирования.

3. Получено уравнение множественной регрессии, позволившее выявить связь контактной жесткости с параметрами эквивалентной поверхности. Проведена проверка адекватности модели и значимости коэффициентов уравнения регрессии. Построены графики зависимости контактной жесткости от параметров качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, А.С. Контактная жесткость неподвижных соединений деталей машин: дис.... д-ра техн. наук / А.С. Иванов. – М., 2006. -245 с.
2. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин/Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.
3. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений/А.Г. Суслов. – М.: Наука, 1977. – 102 с.
4. Тихомиров, В.П. Нейросетевые модели в трибологии/В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов// Трение и износ. - 2000.- Т.21. - №3.-С. 246-251.
5. Суслов, А.Г. Нейросетевое моделирование процесса формирования эксплуатационных свойств деталей при упрочняющей обработке/А.Г. Суслов, В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов, А.О. Горленко// Справочник. Инженерный журнал. - 2000.-№10.- С.8-11.
6. Федоров, В.П. Автоматизированная система
1. Ivanov, Ampere-second. Contact rigidity of motionless connections of details of machines: yew Dr.Sci.Tech./Ampere-second. Ivanov. – M, 2006.- 245 p.
2. Ryzhov, E.V. Contact rigidity of details of machines/E.V. Ryzhov. – M.: Mechanical engineering,

определения параметров шероховатости поверхностей деталей машин/В.П. Федоров, А.А. Кельнер//Измерительная техника. - 1987. - №12. - С. 23-24.

7. Игнатенко, Ю.В. Расчетно-экспериментальная оценка фактической площади контакта деталей машин/Ю.В. Игнатенко, В.П. Тихомиров, Н.М. Пискленова // Динамика, прочность и надежность транспортных машин. – Брянск: БИТМ, 1992. – С. 135-141.
8. Маккул, Дж. Распределение площади, нагрузок, давления и локального повышения температуры в микроконтактах по модели Гринвуда-Вильямсона/Дж. Маккул// Проблемы трения и смазки. - 1988.-№4. – С. 99-105.
9. Зажигаяев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента/Л. С. Зажигаяев, А. А. Кашьян, Ю. И. Романиков.–М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

1966. – 196 p.

3. Suslov, A.G. Technological support of contact rigidity of connections/A.G. Suslov. – M.: Science, 1977. – 102 p.
4. Tikhomirov, V.P. Neural network models in tribology/V.P. Tikhomirov, P.Yu. Shalimov//Friction and

- depreciation. - 2000. - Т.21. - No. 3. – P. 246-251.
5. Suslov, A.G. Neural network modeling of process of forming of operational properties of details in case of the strengthening handling/A.G. Suslov, V.P. Tikhomirov, P.Yu. Shalimov, A.O. Gorlenko//Reference book. Engineering magazine. - 2000.-№10. – P. 8-11.
 6. Fedorov, V.P. The automated system of determination of parameters of a roughness of surfaces of details of machines/V.P. Fedorov, A.A. Kelnert//Measuring equipment. - 1987. - No. 12. – P. 23-24.
 7. Ignatenko, YU.V. Settlement and experimental assessment of the actual area of contact of details of machines/Yu.V. Ignatenko, V.P. Tikhomirov, N. M. Pisklenova//Dynamics, durability and reliability of transport vehicles. – Bryansk: BITM, 1992. – P. 135-141.
 8. McCool, J. Space assignment, loadings, pressure and local temperature increase in micro contacts on the Grinvuda-Vilyamsonadzh model. McCool//Problems of friction and greasing. - 1988.- №4. – P. 99-105.
 9. Zazhigayev, L. S. Planning methods and handlings of results of physical experiment/Ир Zazhigayev, A. A. Kashyan, Yu. I. Romanikov. – М.: Atomizdat, 1978. – 232 p.

Статья поступила в редколлегию 15.09.2015.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Стриженов А.Г.*

Сведения об авторах:

Лемешева Елена Викторовна, ассистент кафедры «Технический сервис» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-915-533-84-06.

Тихомиров Петр Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Технический сервис» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-910-339-39-88.

Атрощенко Анна Михайловна, доцент кафедры «Экономика и управление на предприятиях лесного комплекса и природопользования» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-910-339-3775.

Lemesheva Elena Viktorovna, assistant to Technical Service department of Bryansk state technological university, ph.: 8-915-533-84-06.

Tikhomirov Victor Petrovich, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-910-339-39-88.

Atroshchenko Anna Mikhaelovna, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-910-339-3775.

Булхов Николай Алексеевич, доцент кафедры «Экономика и управление на предприятиях лесного комплекса и природопользования» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-953-271-3154.

Измеров Михаил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: 8-952-960-17-19.

Bulkhov Nikolay Alekseevich, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-953-271-3154.

Izmerov Mikhail Aleksandrovich, Cand.Tech.Sci., associate professor of "Detail of machines" of Bryansk state technical university, ph.: 8-952-960-17-19.

state technological university, ph.: 8-910-339-3775.

Bulkhov Nikolay Alekseevich, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-953-271-3154.

Izmerov Mikhail Aleksandrovich, Cand.Tech.Sci., associate professor of "Detail of machines" of Bryansk state technical university, ph.: 8-952-960-17-19.