

УДК 004.896

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор

В. В. Сеницына, кандидат технических наук

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ВЫБОРА СПОСОБА СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

В данной статье рассмотрена модель системы нечеткой логики для выбора способа сборки соединений с натягом. Приведен пример алгоритмизации и решения задачи выбора способа сборки, отвечающего требованиям качества и производительности сборки соединений с натягом и позволяющего формализовать деятельность конструктора или технолога. Предложена классификация конструкторских и технологических параметров, влияющих на выбор метода сборки. Проведено ранжирование этих параметров. Разработана база знаний и модель системы нечеткой логики по выбору способа сборки соединений с натягом.

**Ключевые слова:** соединение с натягом, метод сборки, нечеткая логика, база знаний, конструктивные и технологические параметры.

### Введение

Учитывая возрастающие требования к точности мехатронных систем, становятся актуальными вопросы обеспечения качества сборки соединений с натягом, что в свою очередь предъявляет повышенные требования к способу их сборки. Одним из методов повышения надежности соединения с натягом (рис. 1) является выбор наиболее подходящего способа их сборки. Выбор метода сборки является творческой и достаточно сложной задачей. Автоматизация процедуры выбора способа сборки позволит сократить время принятия решения и уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

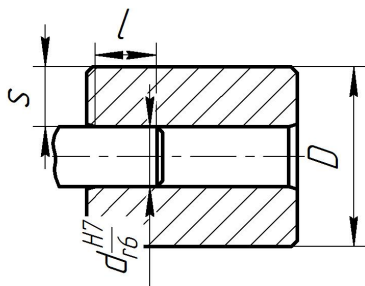


Рис. 1. Соединение с натягом

Задача выбора способа сборки соединений с натягом относится к классу слабоструктурированных, для решения которых успешно применяются методы искусственного интеллекта. В данной статье для решения задачи выбора способа сборки соединений с натягом стальных деталей используется аппарат теории нечетких множеств, т. к. он является одним из эффективных инструментов формализации процесса принятия решения [1].

### Классификация параметров, влияющих на выбор метода сборки

На результат выбора способа сборки соединения с натягом оказывает влияние множество различных факторов. В общем случае их можно разделить на конструкторские, технологические и экономические параметры (рис. 2).

Геометрические параметры определяют особенности конструкции собираемых деталей, которые могут обеспечивать дополнительные напряжения, которые необходимо учитывать при выборе метода сборки.

Физико-механические свойства материалов деталей также необходимо учитывать при выборе способа сборки. Собираемые детали могут быть изготовлены из упругопластичных, хрупких материалов, из материалов с различными коэффициентами температурного расширения и т. д.

В промышленности применяются такие соединения с натягом, которые подвергаются многократной сборке/разборке. Так, например, соединение термозажима и режущего инструмента разбирается и собирается каждый раз при смене инструмента. Учитывая, что не все методы сборки могут обеспечить многократный разбор соединения без потери нагрузочной способности, при выборе способа сборки необходимо принимать во внимание и этот факт.

Для массового производства требуются производственные технологии с максимальной степенью автоматизации. Поэтому возможность автоматизации сборочного процесса также имеет значение при выборе способа сборки.

### Ранжирование параметров, влияющих на выбор метода сборки, по уровню значимости

Ранжирование параметров, влияющих на выбор метода сборки, по уровню значимости выполнено на основании индивидуальных оценок отдельных независимых друг от друга экспертов.

Экспертное оценивание выполнялось на основе весовых коэффициентов. Каждый параметр, влияющий на выбор метода сборки, имел весовой коэффициент от 0 до 10, причем сумма всех весовых коэффициентов должна была быть равна 10.

Значимость параметра определялась как отношение суммы проставленных экспертами весов к количеству экспертов.

В табл. 1 представлены параметры, ранжированные по уровню значимости.

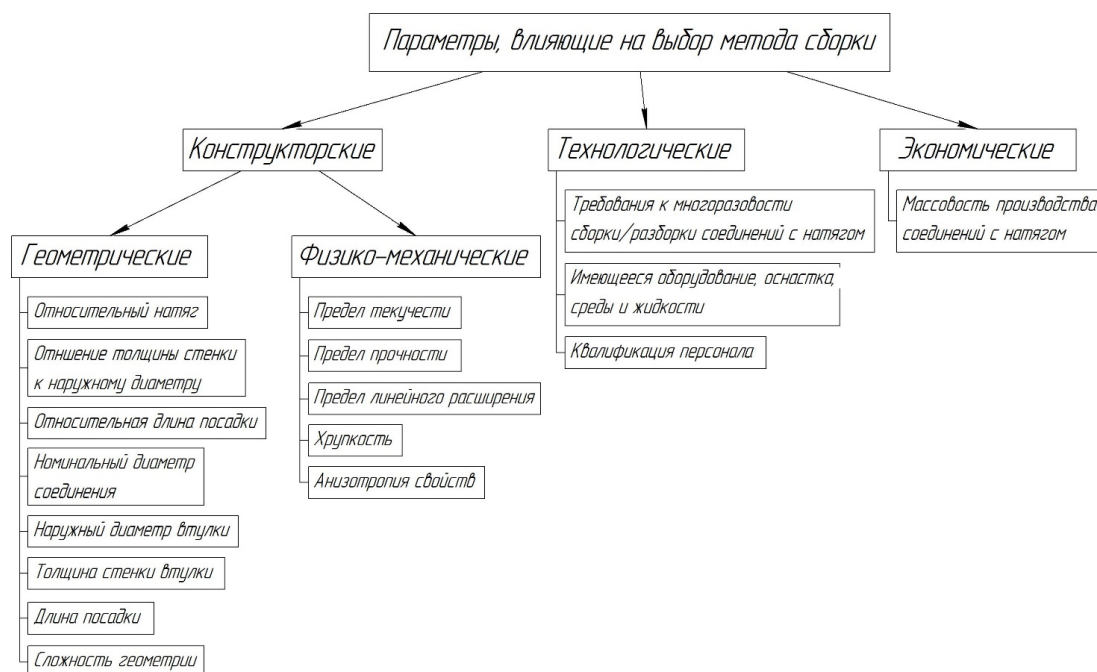


Рис. 2. Классификация параметров, влияющих на выбор метода сборки

Таблица 1. Ранжированная по уровню значимости система конструкторских и технологических параметров

№	Параметр	Значимость
1	Относительный натяг	9,9
2	Отношение толщины стенки к наружному диаметру	9,8
3	Относительная длина посадки	9,7
4	Требования к многоразовости сборки/разборки соединений с натягом	9,5
5	Номинальный диаметр соединения	9,5
6	Коэффициенты линейного расширения	9,4
7	Толщина стенки втулки	9,3
8	Длина посадки	9,3
9	Наружный диаметр втулки	9,2
10	Хрупкость	9,0
11	Анизотропия свойств	8,7
12	Квалификация персонала	8,7
13	Массовость производства соединений с натягом	8,7
14	Имеющееся оборудование, оснастка, среды и жидкости	8,1
15	Сложность геометрии	7,4
16	Предел текучести	6,0
17	Предел прочности	6,0

Согласно принципу Парето, 20 % влияющих факторов формируют 80 % результата. Учет остальных 80 % факторов, вносящих 20 % вклада в результат, усложняют задачу принятия решения, не гарантируя точности. В соответствии с этим принципом в задаче выбора способа сборки в качестве входных переменных группой экспертов отобраны три наиболее значимых геометрических параметра соединения:  $\delta/d$  – относительный натяг;  $s/D$  – отношение толщины стенки к наружному диаметру;  $l/d$  – относительная длина посадки, где  $d$  – номинальный диаметр соединения;  $D$  – наружный диаметр втулки;  $s$  – толщина стенки втулки;  $l$  – длина посадки. Учет

большого числа влияющих факторов, включая экономические, может способствовать повышению качества принятия решения.

Группу экспертов составляли специалисты в области соединений с натягом, доктора и кандидаты технических наук, профессора, специалисты производственных цехов. Анализу подверглись справочные данные технической литературы [2–10], диссертации по теме соединений с натягом [11, 12].

**Модель системы нечеткой логики для выбора способа сборки соединений с натягом**

Входными нечеткими переменными, образующими нечеткие множества, являются относительный натяг, отношение толщины стенки к наружному диаметру и относительная длина посадки. Выходными нечеткими переменными, образующими нечеткие множества, являются способы сборки: механический, тепловой и гидропрессовый.

Входные переменные заданы на соответствующих количественных шкалах базисных множеств  $X_1, X_2, X_3$ , которым ставятся в соответствие нечеткие множества  $M_1 = (x_1, \mu_1(x_1) | x_1 \in X_1)$ ,  $M_2 = (x_2, \mu_2(x_2) | x_2 \in X_2)$  и  $M_3 = (x_3, \mu_3(x_3) | x_3 \in X_3)$  входных лингвистических переменных  $x_i$ , где  $X_i$  – универсальное множество, а  $\mu_i(x_i)$  – функция принадлежности, характеризующая принадлежность элемента  $x_i$  нечеткому множеству  $M_i$  [13].

Выходными нечеткими переменными, образующими нечеткие множества  $N_1 = (y_1, \mu_1(y_1) | y_1 \in Y_1)$ ,  $N_2 = (y_2, \mu_2(y_2) | y_2 \in Y_2)$  и  $N_3 = (y_3, \mu_3(y_3) | y_3 \in Y_3)$ , являются способы сборки: механический, тепловой и гидропрессовый. Функции принадлежности входных и выходных переменных к своим нечетким

множествам с  $l$ -ми лингвистическими термами  $\mu_l(x_i)$  и  $\mu_l(y_j)$  представлены на рис. 3–6. Все три выходные переменные имеют одинаковый вид функции принадлежности.

Значения термов определяются на основе экспертных оценок лингвистических переменных. Экспертиза проводилась с использованием метода экспертных оценок, подразумевающего выполнение следующих этапов: подбор экспертов; опрос экспертов; формирование количественных оценок; создание базы знаний правил.

Лингвистические переменные, а также экспертные оценки значений четких переменных  $x_i, y_j$  и соответствующие им термы  $l$  приведены в табл. 2.

Согласно [14] при формировании функций принадлежности необходимо стремиться к тому, чтобы степени принадлежности границ интервала крайним термам были равны единице. В этом случае выполняется естественное правило, заключающееся в том, что чем меньше (больше) значение переменной, тем в большей степени оно соответствует крайнему терму.

Таблица 2. Переменные, оценки переменных и соответствующие термы лингвистических переменных

Переменные $x_i, y_j$	Экспертные оценки переменных $x_i$	Термы, $l$
Относительный натяг, $x_1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,00001÷0,00019</li> <li>• 0,0002÷0,0009</li> <li>• 0,001÷0,002</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Легкий</li> <li>• Средний</li> <li>• Тяжелый</li> </ul>
Отношение толщины стенки к наружному диаметру, $x_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,025÷0,17</li> <li>• 0,17÷0,35</li> <li>• 0,35÷0,5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Тонкостенная</li> <li>• Средней толщины</li> <li>• Толстостенная</li> </ul>
Относительная длина посадки, $x_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,5÷1,0</li> <li>• 1,0÷1,5</li> <li>• 1,5÷2,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Малая</li> <li>• Средняя</li> <li>• Большая</li> </ul>
Механический способ сборки соединений с натягом, $y_1$		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Не применим</li> <li>• Скорее нет, чем да</li> <li>• Скорее да, чем нет</li> <li>• Применим</li> </ul>
Тепловой способ сборки соединений с натягом, $y_2$		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Не применим</li> <li>• Скорее нет, чем да</li> <li>• Скорее да, чем нет</li> <li>• Применим</li> </ul>
Гидропрессовый способ сборки соединений с натягом, $y_3$		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Не применим</li> <li>• Скорее нет, чем да</li> <li>• Скорее да, чем нет</li> <li>• Применим</li> </ul>

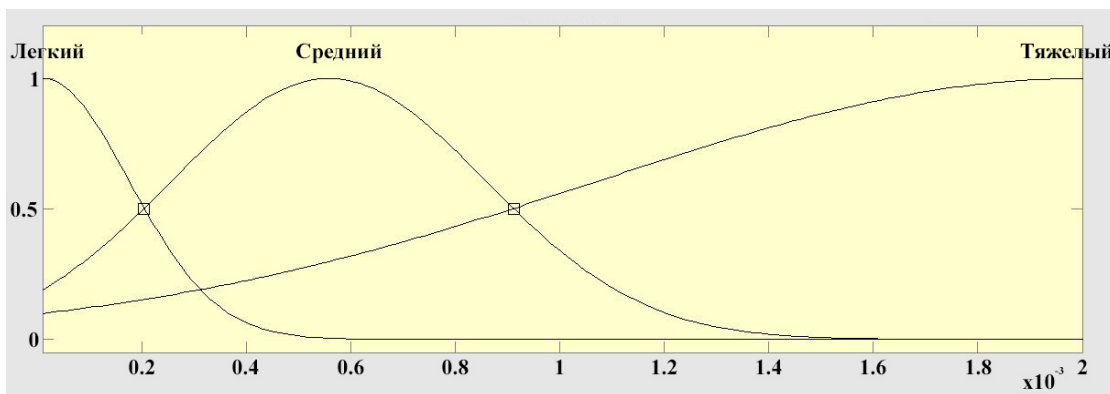


Рис. 3. Вид функции принадлежности входной переменной «Относительный натяг»



Рис. 4. Вид функции принадлежности входной переменной «Отношение толщины стенки к наружному диаметру»

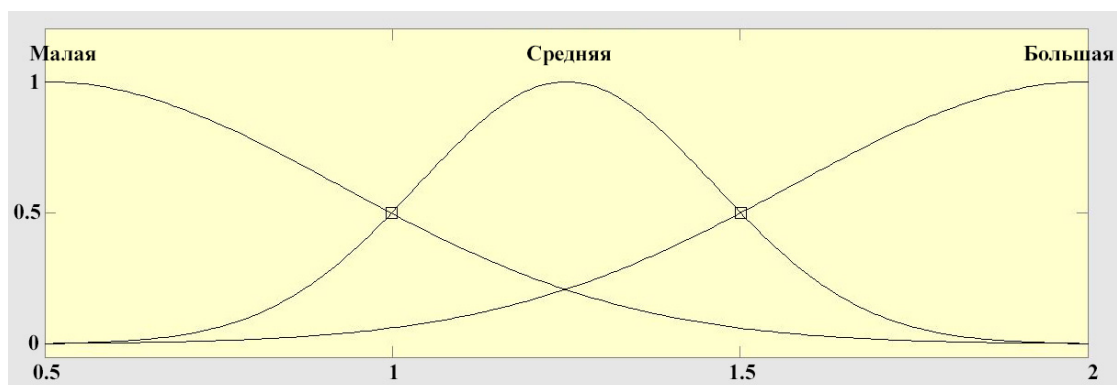


Рис. 5. Вид функции принадлежности входной переменной «Относительная длина посадки»

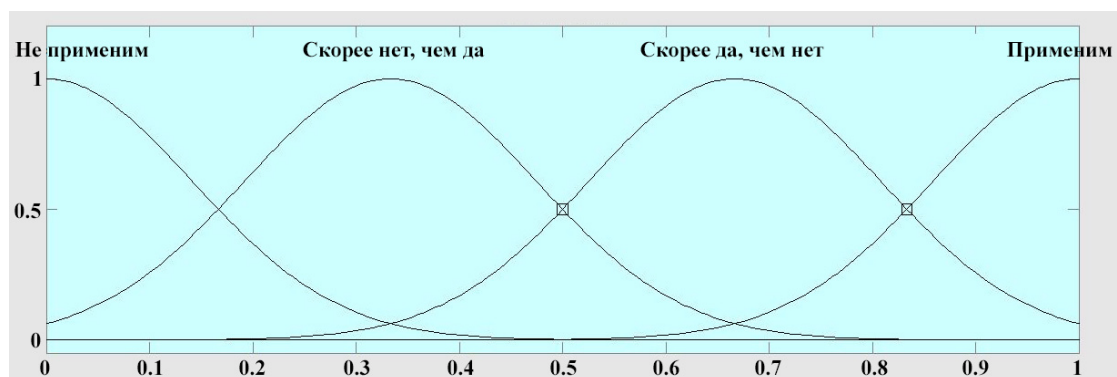


Рис. 6. Вид функции принадлежности выходной переменной «Механический способ сборки», «Тепловой способ сборки», «Гидропессовый способ сборки»

**База знаний по выбору способа сборки соединений с натягом**

При построении системы принятия решения для описания зависимостей между лингвистическими переменными использовались производственные правила. При проектировании базы знаний учитывались следующие правила [15]:

1. Должно существовать хотя бы одно правило для каждого термина выходной переменной.
2. Для любого термина входной переменной должно существовать хотя бы одно правило, в котором терм используется в качестве посылки.

На основе экспертных оценок и суждений разработан следующий набор правил и их весовые коэффициенты:

1. Если «Относительная длина посадки» – малая, то решение для МС – «Применим», для ТС – «Применим», для ГПС – «Применим» (1).
2. Если «Относительная длина посадки» – средняя, то решение для МС – «Скорее да, чем нет», для ТС – «Скорее нет, чем да», для ГПС – «Применим» (1).
3. Если «Относительная длина посадки» – большая, то решение для МС – «Не применим», для ТС – «Не применим», для ГПС – «Применим» (1).
4. Если «Отношение толщины стенки к наружному диаметру» – тонкостенная, то решение для МС – «Не применим», для ТС – «Применим», для ГПС – «Не применим» (0,5).
5. Если «Отношение толщины стенки к наружному диаметру» – средней толщины, то решение для

МС – «Скорее нет, чем да», для ТС – «Скорее да, чем нет», для ГПС – «Скорее нет, чем да» (0,5).

6. Если «Отношение толщины стенки к наружному диаметру» – толстостенная, то решение для МС – «Применим», для ТС – «Применим», для ГПС – «Применим» (0,5).
7. Если «Относительный натяг» – легкий, то решение для МС – «Применим», для ТС – «Применим», для ГПС – «Применим» (0,75).
8. Если «Относительный натяг» – средний, то решение для МС – «Скорее нет, чем да», для ТС – «Применим», для ГПС – «Применим» (0,75).
9. Если «Относительный натяг» – тяжелый, то решение для МС – «Не применим», для ТС – «Скорее да, чем нет», для ГПС – «Скорее да, чем нет» (0,75).

Здесь (1), (0,75), (0,5) – весовой коэффициент правил.

На основании сформулированных правил составлена матрица знаний по выбору метода сборки соединения с натягом (табл. 3).

В разработанной модели для дефазификации использован метод «центр тяжести» с вычислением четкого значения по формуле:

$$y_i = \frac{\int y_i \cdot \mu_p(y_i) dy}{\int \mu_p(y_i) dy},$$

где  $\mu_p(y_i)$  – результирующая функция принадлежности для выходных переменных.

Таблица 3. Матрица знаний по выбору методу сборки соединений с натягом

№	Входные переменные			Выходные переменные			Весовой коэф.
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	–	–	Малая	1	1	1	1,0
2	–	–	Средняя	0,66	0,33	1	1,0
3	–	–	Большая	0	0	1	1,0
4	–	Тонкостенные	–	0	1	0	0,5
5	–	Средней толщины	–	0,33	0,66	0,33	0,5
6	–	Толстостенные	–	1	1	1	0,5
7	Малый	–	–	1	1	1	0,75
8	Средний	–	–	0,33	1	1	0,75
9	Большой	–	–	0	0,66	0,66	0,75

На рис. 7 представлена модель системы нечеткой логики, разработанная в среде MatLab. Варьируя значения входных переменных, можем получить научно

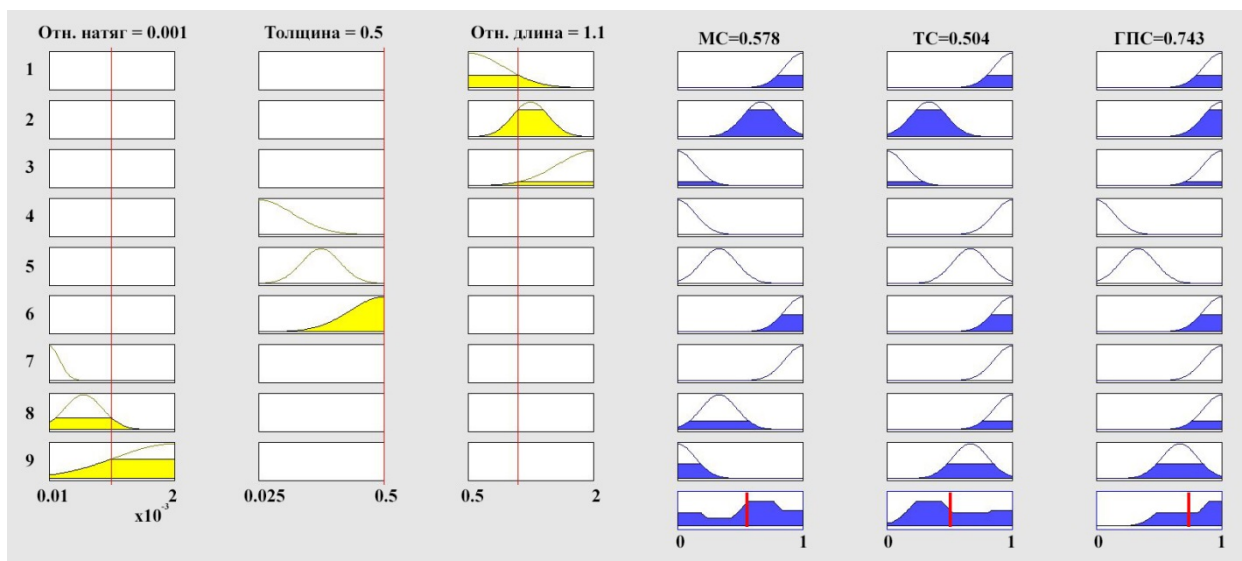


Рис. 7. Модель системы нечеткой логики для выбора способа сборки соединений с натягом

### Применение разработанной системы автоматизированного выбора метода сборки соединений с натягом

Рассмотрим в качестве примера соединения с натягом колесную пару железнодорожного подвижного состава. При следующих четких значениях входных переменных: «Относительный натяг» – 0,001; «Отношение толщины стенки к наружному диаметру» – 0,5; «Относительная длина посадки» – 1,1; выходные переменные после процедуры дефазификации принимают значения: «Механический способ сборки» – 0,578; «Тепловой способ сборки» – 0,504; «Гидропрессовый способ сборки» – 0,743 (табл. 5). Соглас-

обоснованные рекомендации по выбору способа сборки соединений с натягом в виде четких значений выходных переменных. Тонкой вертикальной линией выделены значения входных переменных. В правой нижней части рис. 6 толстой чертой обозначены дефазификации по методу «центр тяжести».

Для каждой выходной переменной после процедуры дефазификации получается четкое значение, характеризующее уровень применимости каждого способа для сборки соединения с рассмотренными входными параметрами. Интерпретация уровня применимости в рекомендации по выбору способа сборки производится в соответствии с табл. 4.

Таблица 4. Интерпретация результатов расчета системы нечеткой логики

Диапазон уровня применимости	Интерпретация
0...0,25	Не применим
0,25...0,5	Скорее нет, чем да
0,5...0,75	Скорее да, чем нет
0,75...1	Применим

но полученным результатам для сборки соединения с данными параметрами подходят все три способа, однако наиболее подходящим способом является гидропрессовый.

Из практики и современных стандартов [16] известно, что колесные пары собираются механическим и тепловым способами. Данное расхождение может свидетельствовать о недостаточном качестве принятия решения разработанной системы или об устоявшихся традициях в области сборки, связанных с человеческим фактором и идущих вразрез с целью повышения качества и надежности собираемых соединений с натягом.



Таблица 5. Параметры соединения с натягом и значения уровня применимости

Пример соединения с натягом	Относительный натяг	Отношение толщины стенки к наружному диаметру	Относительная длина посадки	МС	ТС	ГПС
Тип оси – РМЗ [13] $d = 197$ мм $l = 226$ мм $N = 0,10 - 0,25$ мм	0,001	0,5	1,1	0,578	0,504	0,743

Для более широкого применения системы и ее адаптации для большего круга задач из различных областей машиностроения требуется доработка и дополнительная настройка.

### Выводы

1. В общем случае при выборе способа сборки необходимо учитывать более 17 параметров, оказывающих влияние на выбор способа сборки соединений с натягом.

2. Ранжированная по уровню значимости система конструкторских и технологических параметров, влияющих на выбор метода сборки, показала, что тремя наиболее значимыми параметрами являются относительный натяг, отношение толщины стенки к наружному диаметру, относительная длина посадки.

3. Разработанная модель интеллектуальной системы принятия решения на основе метода экспертных оценок и нечеткой логики способствует накоплению и многократному использованию знаний в области сборки соединений с натягом. Применение разработанной системы на практике позволит сократить время на принятие решения о методе сборки соединений с натягом.

4. Предложенная система может являться математической моделью соответствующего блока САПР, отвечающего за проектирование соединений с натягом.

### Библиографические ссылки

1. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.

2. Абрамов И. В., Фаттиев Ф. Ф. [и др.]. Высоконапряженные соединения с гарантированным натягом. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. – 300 с. – ISBN 5-7526-0114-2.

3. Абрамов И. В., Абрамов А. И., Сеницын А. Н., Сеницына В. В. Напряженно-деформированное состояние деталей соединения с натягом под действием изгибающего момента // Вестник машиностроения. – 2010. – № 8. – С. 18–21. – ISSN 00424633.

4. Абрамов И. В., Абрамов А. И., Сеницын А. Н., Сеницына В. В. Теоретическое обоснование новых способов сборки и разборки соединений с натягом // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2011. – № 3. – С. 11–15. – ISSN 0202-3350.

5. Берникер Е. И. Посадки с натягом в машиностроении. – Л., Машиностроение, 1966. – 167 с.

6. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

7. Косилов А. Г., Мецзяков Р. К. Справочник технолога-машиностроителя. – В 2 т. Т. 2. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с. : ил.

8. Мяжков В. Д., Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А. Допуски и посадки : справочник. – В 2 ч. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – Ч. 1. – 543 с. : ил.

9. Щенятский А. В., Абрамов И. В., Соснович Э. В. [и др.]. Теория и технология гидропрессовых соединений – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – 496 с. : ил. – (Монографии ИжГТУ).

10. Abramov I. V., Abramov A. I., Sinityn A. N., Sinityna V. V. and Petrov A. V. Experimental plant for interference fit disassembling. // MECHATRONIKA, 2011 14th International Symposium, 2011. P. 90–92. – ISBN 978-1-61284-821-1.

11. Абрамов И. В. Исследование и совершенствование гидропрессового метода сборки соединений с натягом : автореф. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1970. – 20 с.

12. Щенятский А. В. Напряженно-деформированное состояние и нагруженная способность многослойных соединений с натягом : дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 1993. – 171 с.

13. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с. : ил.

14. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.

15. Там же.

16. ГОСТ 4835–2006. Колесные пары вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм.

\*\*\*

A. V. Shchenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. V. Sinityna, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Development of intelligent decision support system for selection of interference fit assembly method based on fuzzy approach

In this paper the model of pressure couplings assembly method selection is developed using fuzzy logic technique. A systematic approach to assembly method selection problem is proposed. Example of assembly method selection problem algorithmization and solution is considered. Classification of design and process parameters that affect the assembly method selection is proposed. The parameters are ranked. Knowledge base and model of system for selection of interference fit assembly method are developed.

**Keywords:** pressure joint, assembly method, fuzzy logic, knowledge base, design and process parameters.

Получено: 06.10.14