УДК 658.562:681.5

Н.А. Зубрецкая, С.С. Федин

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев

УПРАВЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработана самонастраивающаяся нечеткая модель для управления стабильностью технологического процесса на основе прогнозирования отклонения размерного параметра деталей от номинального значения.

Ключевые слова: *управление, стабильность, технологический процесс, самонастраивающаяся нечеткая модель, контролируемый размер.*

Введение

В настоящее время усовершенствование современных систем автоматического контроля и управления стабильностью технологических процессов изготовления деталей осуществляется в направлении повышения степени их интеллектуализации на основе использования нечеткого моделирования [1, 2]. В работах С.С. Волосова, З.Ш. Гейлера, М.С. Невельсона и других ученых обоснована необходимость применения самонастраивающихся систем управления для стабилизации управляемого размерного параметра изготавливаемых деталей на металлорежущем станке с активным контролем [3, 4]. В таких системах цель управления достигается на основе прогноза величины отклонения размерного параметра в цикле подналадки и корректировке уровня размерной настройки системы станок-приспособление-инструмент-деталь в соответствии с прогнозируемой величиной. При этом актуальной задачей является получение прогноза с наибольшей возможной точностью и реализация на его основе алгоритма управления стабильностью технологического процесса.

Целью статьи является создание самонастраивающейся нечеткой модели для управления стабильностью технологического процесса на основе прогнозирования отклонения размерного параметра изготавливаемых деталей от номинального значения.

Постановка задачи управления стабильностью процесса

Пусть реализация последовательности отклонений контролируемого размера обработанных деталей $\{X_n\}$ представлена выражением

$$X_n=L_n+\mu_n+\xi_n, \quad (1)$$

где L_n – детерминированная систематическая составляющая (тренд); μ_n – регулярная медленно изменяющаяся (низкочастотная) случайная функциональная коррелированная составляющая; ξ_n – нерегулярная быстро изменяющаяся (высокочастотная) случайная некоррелированная составляющая.

При условии линейного тренда значение регулируемого размерного параметра определяется зависимостью (1), если $\mu_n=0$ [3]. При регулировании размерного параметра с использованием самонастраивающейся системы управления с активным контролем и подналадкой предельную погрешность процесса регулирования, т.е. отклонение контролируемого размера X_n n-й детали от номинального значения, можно представить в виде

$$X_n=an+\xi_n+U_n,$$

где an – систематическая линейная составляющая погрешности; a – величина систематической линейной составляющей погрешности обработки, соответствующая одной детали; n – порядковый номер детали; ξ_n – случайная составляющая погрешности; U_n – корректирующее воздействие механизма регулирования [3].

Процесс стабилизации контролируемого размера осуществляется введением корректирующего воздействия U_n, которое компенсирует составляющую an на основе оценки ожидаемого (прогнозного) значения X_n, полученного по измеренным значениям отклонений X_{n-1}, X_{n-2},…, X_{n-N} в выборке объема N. При этом оптимальный объем выборки устанавливают исходя из конкретного технологического процесса. Результаты исследования, приведенные в работе [5], показывают, что при автоматизированной обработке деталей на настроенных станках целесообразно принимать N=6. Учитывая тот факт, что процесс прогнозирования реализуется в условиях детерминировано-стохастического нестационарного характера изменения во времени величины отклонения X_n контролируемого размера n-й детали от номинального значения, эффективным средством решения задач прогноза и управления стабильностью технологических процессов является аппарат

нечетких множеств, нечеткой логики и нечеткого моделирования.

Создание нечеткой прогнозной модели

Исходные данные для создания нечеткой модели представляли в виде точечной диаграммы отклонений диаметра 150-ти последовательно обрабатываемых деталей типа вал ∅50h11 из стали Ст45 в пределах поля допуска контролируемого размера T=200 мкм. Временной ряд отклонений диаметра содержит шесть реализаций по 25 значений, полученных между подналадками станка при одинаковых режимах чернового точения. На основе статистического анализа исходных данных установлен линейный характер тренда контролируемого размера X_n=5,85n+27,3 (рис. 1).

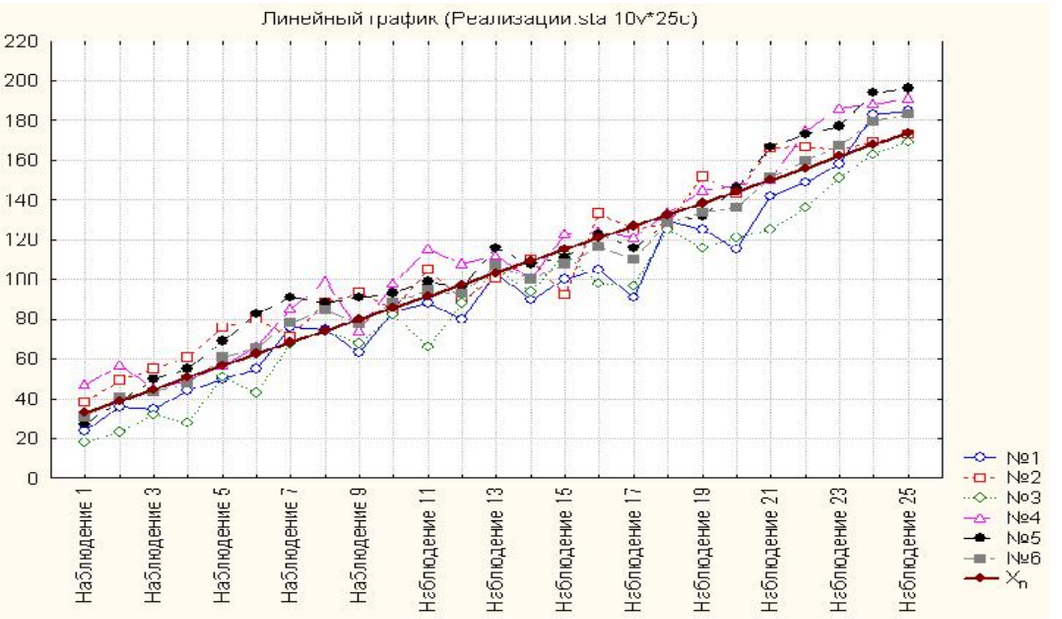

Рис. 1. Динамика изменения отклонений диаметра вала от номинального значения для шести реализаций технологического процесса

При создании нечеткой прогнозной модели период наблюдения включает N=6 ретроспективных значений отклонения диаметра вала X_1–X_6, а период упреждения прогноза равен одному уровню временного ряда, т.е. прогнозируемым показателем Y является X_7.

Выборка исходных данных (значений контролируемого параметра), предназначенная для создания функций принадлежности и базы правил нечеткой модели включала пять реализаций отклонений диаметра вала $\{X_n\}$, последовательно смещенных во времени на шесть уровней, т.е. число строк выборки m=125-6=119 (табл. 1). Для получения прогнозных значений отклонений диаметра использовали выборку данных 6-й реализации процесса механической обработки деталей (табл. 2).

Создание нечеткой модели осуществляли с использованием лицензионной версии системы нечеткого моделирования CubiCalc 2.0 на основе реализации четырех процедур: фаззификации (введения нечеткости для исходных данных); импликации (нахождения функций принадлежности); агрегирования (нахождения результирующей функции принадлежности всей совокупности правил); дефаззификации (приведения к четкости и получения количественной оценки прогнозируемого показателя) [6].

Таблица 1

Фрагмент выборки исходных данных X_n, мкм

m	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y
1	24	36	35	44	50	55	76
2	36	35	44	50	55	76	75
3	35	44	50	55	76	75	63
4	44	50	55	76	75	63	84
5	50	55	76	75	63	84	88
6	55	76	75	63	84	88	80
7	76	75	63	84	88	80	103
8	75	63	84	88	80	103	90
9	63	84	88	80	103	90	100
10	84	88	80	103	90	100	105
11	88	80	103	90	100	105	91
12	80	103	90	100	105	91	129
13	103	90	100	105	91	129	125
14	90	100	105	91	129	125	115
15	100	105	91	129	125	115	142
16	105	91	129	125	115	142	149
17	91	129	125	115	142	149	158

18	129	125	115	142	149	158	183
19	125	115	142	149	158	183	185
…	…	…	…	…	…	…	…
119	132	146	167	173	177	194	196

Таблица 2

Выборка данных 6-й реализации технологического процесса

m	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y
1	31	41	43	47	61	65	78
2	41	43	47	61	65	78	85
3	43	47	61	65	78	85	78
4	47	61	65	78	85	78	88
5	61	65	78	85	78	88	95
6	65	78	85	78	88	95	92
7	78	85	78	88	95	92	107
8	85	78	88	95	92	107	100
9	78	88	95	92	107	100	108
10	88	95	92	107	100	108	117
11	95	92	107	100	108	117	110
12	92	107	100	108	117	110	129
13	107	100	108	117	110	129	134
14	100	108	117	110	129	134	136
15	108	117	110	129	134	136	151
16	117	110	129	134	136	151	160
17	110	129	134	136	151	160	167
18	129	134	136	151	160	167	179
19	134	136	151	160	167	179	183

Фаззификацию и импликацию входных значений X_1–X_6 и прогнозируемого показателя Y осуществляли с использованием специальной утилиты Rule Maker, предназначенной для кластеризации массивов исходных данных и нахождения связей между выделенными группами в виде нечетких правил [7, 8].

Установление соответствующих нечетких правил осуществляли на основе кусочно-линейной интерполяции с использованием метода Sparse Interpolation приложения Rule Maker (рис. 2). Отличительной особенностью этого метода является преобразование строк таблицы 1 в кластеры и установление корреляционных зависимостей между найденными кластерами при создании базы нечетких правил самонастраивающейся нечеткой модели.

В результате реализации процедур фаззификации и импликации получены треугольные функции принадлежности входных нечетких переменных X_1–X_5 и X_6, а также выходной нечеткой переменной Y, представленные на рис. 3 – 5.

Сформированная база нечетких логических правил содержит 119 правил (рис. 6).

Результат использования разработанной нечеткой модели для прогнозирования значений отклонений диаметра вала на основе 6-й реализации (табл. 2) представлен на рис. 7.

Процедуры агрегирования и дефаззификации осуществляли на основе метода дискретного выбора наилучшего правила (Discrete choice, best rule) и центроидного метода (CENTROID) (рис. 8).

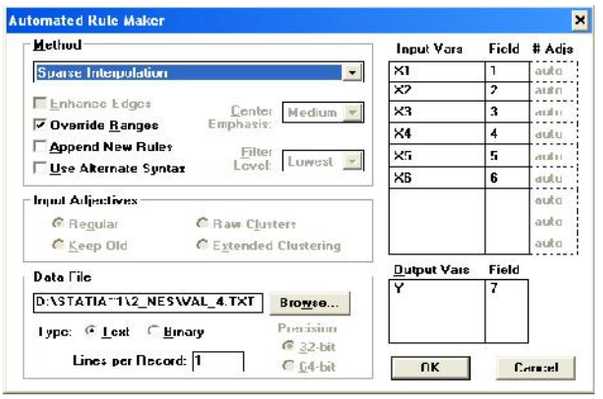

Рис. 2. Интерфейс утилиты Rule Maker системы CubiCalc 2.0

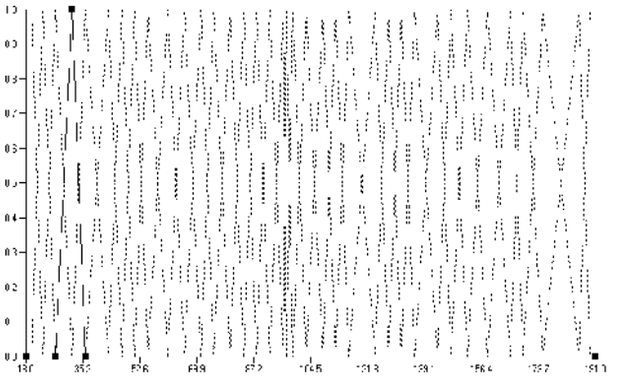

Рис. 3. Функции принадлежности входных нечетких переменных X_1–X_5

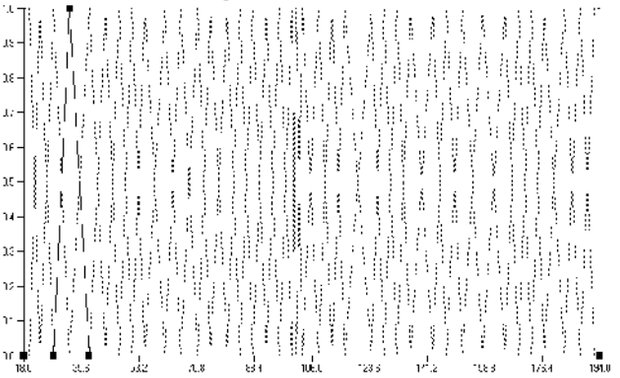

Рис. 4. Функции принадлежности входной нечеткой переменной X_6

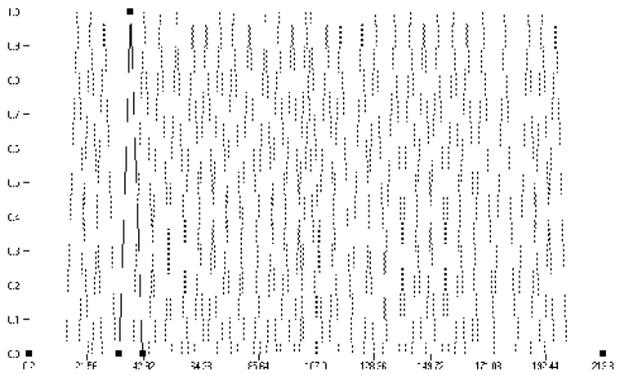

Рис. 5. Функции принадлежности выходной нечеткой переменной Y

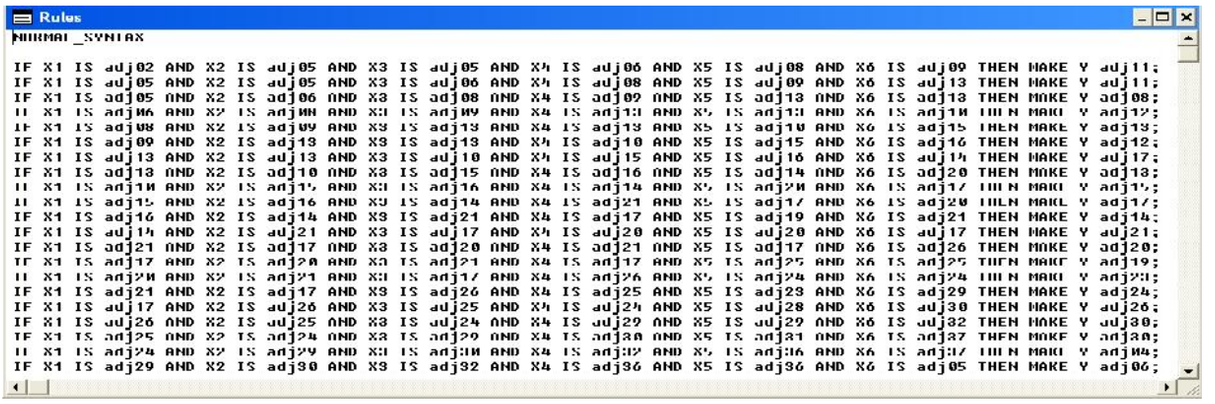

Рис. 6. Фрагмент базы нечетких логических правил

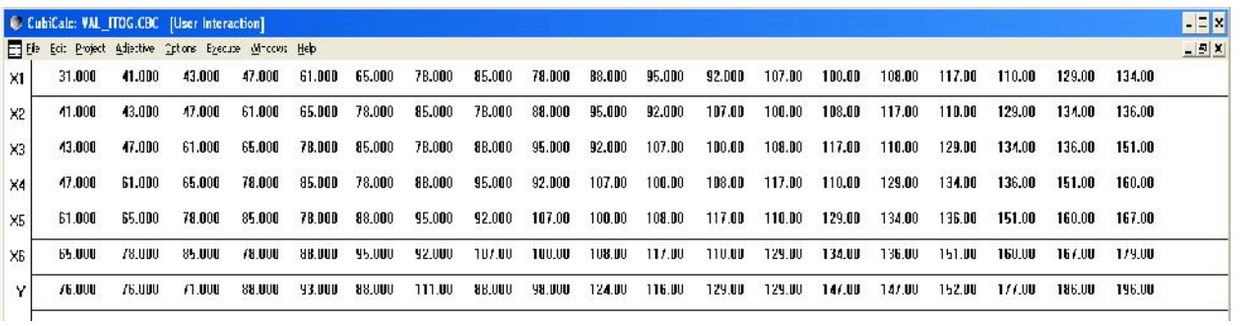

Рис. 8. Результат прогнозирования отклонений диаметра вала для 6-й реализации технологического процесса

Рис. 7. Стратегия выполнения правила в системе CubiCalc 2.0

Верификация результатов прогнозирования

Верификацию прогноза осуществляли на основе t-критерия для независимых выборок фактических Y_i и прогнозных $\hat{Y}_i$ значений отклонений диаметра (рис. 9, рис. 10), а также статистических критериев оценки погрешности прогноза (табл. 3).

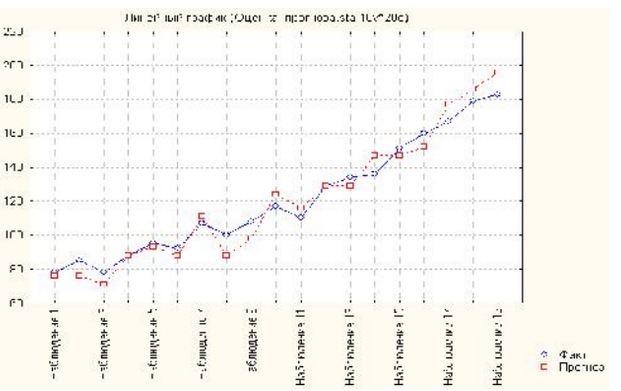

Рис. 9. Фактические и прогнозные значения контролируемого размера

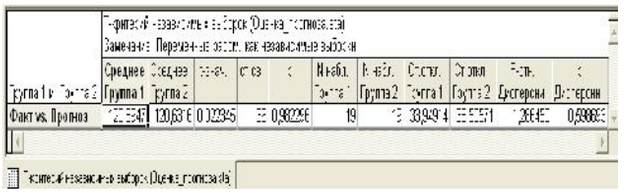

Рис. 10. Оценка *t*-критерия для независимых выборок в системе статистического анализа данных и прогнозирования STATISTICA 6.1

Результат использования *t*-критерия подтверждает достоверность прогноза, поскольку расчетное значение уровня значимости p=0,982 значительно превышает критическое значение p=0,05 (рис. 10), т.е. отсутствует значимое различие между средними значениями выборок фактических и прогнозных отклонений контролируемого размера с учетом их вариации.

Таблица 3

Статистические критерии оценки погрешности прогноза

Критерий	Оценка	Значение оценки
Средняя абсолютная погрешность Mean Absolute Deviation	$MAD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|Y_i - \hat{Y}_i\right\|$	6,36 мкм
Среднеквадратическая погрешность Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}$	7,41 мкм
Средняя абсолютная погрешность в процентах Mean Absolute Percentage Error	$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left\|Y_i - \hat{Y}_i\right\|}{Y_i}\cdot 100$	5,34%
Средняя относительная погрешность Mean Percentage Error	$MPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)}{Y_i}\cdot 100$	1,10%
Максимальная относительная погрешность	$\varepsilon = \frac{RMSE}{Y_i^{min}}\cdot 100$	9,95%

Наряду с критериями (табл. 3), получена оценка достоверности прогноза в виде отношения стандартного отклонения абсолютной погрешности прогноза к стандартному отклонению прогнозируемого показателя $S = \sigma_{\left|Y_i - \hat{Y}_i\right|} \Big/ \sigma_{Y_i} = 0{,}12$.

Значения всех полученных оценок свидетельствуют о высокой точности и достоверности прогноза.

Выводы

Установлено, что использование нечеткого моделирования позволяет с точностью 90 % – 99 % прогнозировать величину отклонения контролируемого размера деталей типа вал от номинального значения. С использованием системы CubiCalc 2.0 разработана самонастраивающаяся нечеткая модель для управления стабильностью технологического процесса изготовления деталей.

Список литературы

1. Емельянов С. Г. Автоматизированные нечетко-логические системы управления: моногр. / Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 176 с.

2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пегат А. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009. – 798 с.

3. Волосов С. С. Управление качеством продукции средствами активного контроля / С. С. Волосов, З. Ш. Гейлер. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 264 с.

4. Невельсон М. С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках / Невельсон М. С. – Л.: Машиностроение, 1982. – 184 с.

5. Гейлер З. Ш. Самонастраивающиеся системы активного контроля размеров / Гейлер З. Ш. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

6. Корнеев В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев, А. Ф. Гареев, С. В. Васютин, В. В. Райх. – М.: Нолижд, 2000. – 352 с.

7. Федин С. С. Информационное обеспечение качества деталей машиностроения с использованием модели нечеткого логического вывода / С. С. Федин, Н. А. Зубрецкая, А. С. Гончаров // Системи обробки інформації. – 2012. – № 2(100). – С. 104–107.

8. Зубрецька Н. А. Нейро-нечітке управління точністю та стабільністю технологічних процесів механічної обробки деталей / Н. А. Зубрецька // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – № 3(63) – С. 49–53.

Поступила в редакцію 14.04.2014

Рецензент: д-р. техн. наук., проф. И.В. Петко, Киевский национальный университет технологий и дизайна.

УПРАВЛІННЯ СТАБІЛЬНІСТЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Н.А. Зубрецька, С.С. Федін

Розроблено самоналагоджувальну нечітку модель для управління стабільністю технологічного процесу на основі прогнозування відхилення розмірного параметра деталей від номінального значення.

Ключові слова: *управління, стабільність, технологічний процес, самоналагоджувальна нечітка модель, контрольований розмір.*

STABILITY CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PARTS BASED ON FUZZY MODELING

N.A. Zubreckaya, S.S. Fedin

Developed adaptive fuzzy model for stability control technological process based on the forecasting of the size of the parameter deviations of parts from the nominal value.

Keywords: *control, stability, technological process, adaptive fuzzy model, controlled size.*