

УДК 658.512; 004.652
DOI:10.30987/2223-4608-2021-7-20-28

Ю.Л. Чигиринский, д.т.н.,
А.Р. Ингеманссон, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)
E-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

Математические модели оперативного управления технологическими режимами лезвийной обработки

Построены регрессионные модели, устанавливающие взаимосвязь микрогеометрических параметров поверхности, получаемой в результате токарной и фрезерной обработки с технологическими режимами, механическими характеристиками конструкционного материала и теплофизическими параметрами материалов контактной пары «заготовка – режущая часть инструмента». Проведен сравнительный анализ достоверности и точности расчетных зависимостей, применяемых для технологической подготовки производства и построения систем адаптивного управления механической обработкой в цифровых производственных системах.

Ключевые слова: технологическая система; процесс обработки; оперативное управление; система адаптивного управления; параметр регулирования; алгоритм регулирования; регрессионная модель; нормирование.

J.L. Tchigirinsky, Dr. Sc. Tech.,
A.R. Ingemansson, Can. Sc. Tech.
(FSBEI HE “Volgograd State Technical University”, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

Mathematical model of technological mode on-line control at blade processing

There are formed regression models defining micro-geometrical parameters correlation of the surface obtained as a result of turning and milling with technological modes, mechanical characteristics of structural material and thermal-physical parameters of materials of the “blank-tool tip” contact pair. A comparative analysis of adequacy and accuracy of design dependences used for technological pre-production and formation of the systems for machining adaptive control in digital production systems.

Keywords: technological system; treatment process; on-line control; system of adaptive control; adjustment parameter; adjustment algorithm; regression model; regulation.

Введение

В качестве одного из направлений развития машиностроительного и, в частности, металлообрабатывающего производства в программных документах Национальной Технологической Инициативы [1] заявлено применение основных положений концепции «Industry 4.0». В основу промышленной реализации этой концепции положено преимущественное применение в производстве, так называемых «киберфизических» или «цифровых» производственных систем [2, 3]. Базовым тезисом концепции «Industry 4.0» является возможность получения и обработки в режиме «реального времени» цифровой информации о текущем состоянии технологиче-

ской системы в целом и отдельных элементов технологической системы (рис. 1).

Наибольший интерес, с точки зрения результатов производства, представляет процесс обработки, который мы рассматриваем в качестве объекта управления (ОУ). Сенсорная составляющая ОУ включает собственно обрабатываемую заготовку и режущий инструмент, т.е. элементы, состоянием которых определяется работоспособность объекта управления. Исполнительная составляющая представлена условиями, определяющими возможность направленного изменения состояния сенсорной части – технологическими режимами обработки и комплексом физико-химических свойств материалов контактной пары «режущая часть инструмента – обрабатываемая заготовка».

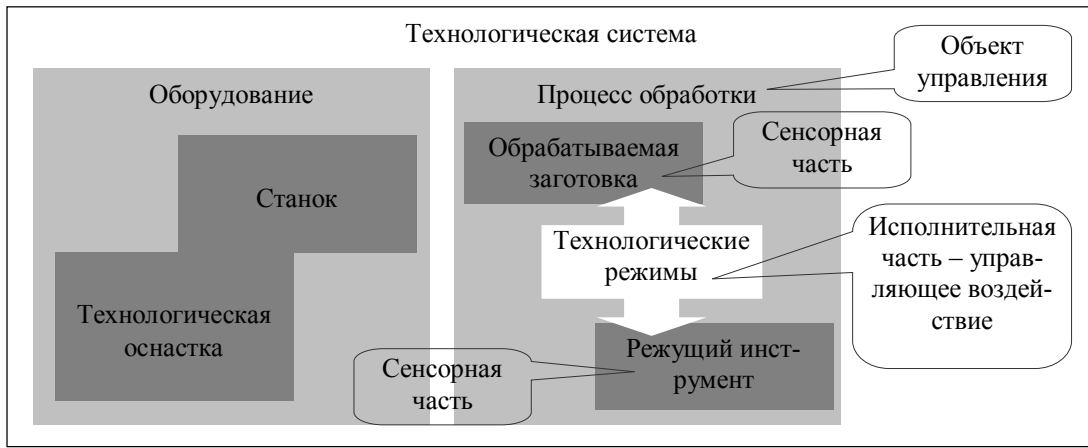


Рис. 1. Элементы технологической системы

Цель функционирования рассматриваемого объекта управления заключается в получении изделия заданного качества при обеспечении работоспособности режущего инструмента.

Математическое моделирование процессов механической обработки

В системах управления математические модели используются для определения закона изменения управляющего воздействия для того, чтобы была достигнута цель управления. В рамках данного исследования рассматриваются функциональные [4] математические модели, отражающие только внешне воспринимаемое функционирование объекта. Это связано с

существенной, с точки зрения теории систем, сложностью процессов механической обработки, представляющих собой совокупность множества элементарных физических и химических явлений: деформационных, термических, диффузионных и т. д. При этом необходимо учитывать существенную неоднозначность свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки. Следовательно, с учетом явно выраженного стохастического характера рассматриваемых процессов, для моделирования необходимо применять статистические методы. Функциональная статистическая модель схематично может быть представлена в виде (рис. 2) «черного ящика».

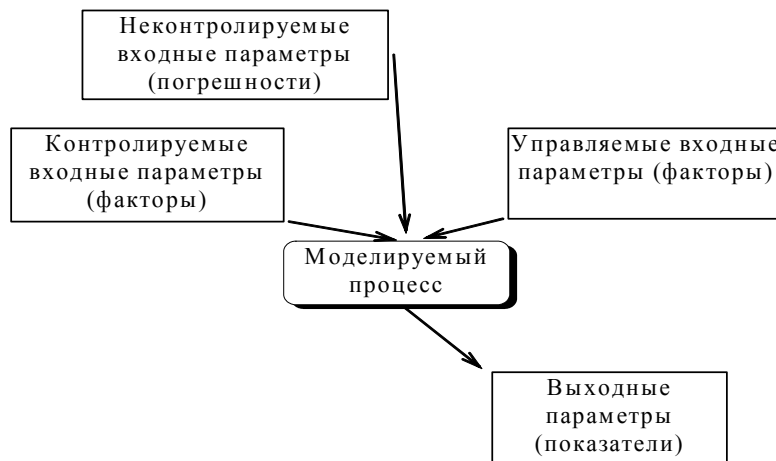


Рис. 2. Схема функциональной математической модели [5]

Отметим в качестве особенности функциональных моделей малую степень детализации знаний и невозможность объяснения внутренних причин функционирования изучаемой системы. Вместе с тем функциональные статистические модели позволяют с достаточной

достоверностью получить количественную оценку функционирования системы. Отличительной особенностью функциональных моделей является низкая, по сравнению с другими видами математических моделей, трудоемкость и относительная простота моделирования.

Основное применение функциональные модели получили на начальных этапах изучения сложных процессов, когда требуется получить предварительную оценку влияния технологических факторов на результат процесса. Вторая область применения функциональных моделей – «быстрое» получение инструментальных средств для количественной оценки результатов функционирования сложной технической или технологической системы. При этом относительная простота получения математической модели оказывается приоритетной, по сравнению с достоверностью результатов моделирования. Именно поэтому «обязательными характеристиками» функциональных моделей являются оценки погрешности моделирования и адекватности модели [5].

В качестве независимых или объясняющих переменных в моделях такого вида используются количественные оценки управляемых и, в некоторых случаях, контролируемых технологических факторов – входные параметры

модели. Третья группа входных параметров – неконтролируемые параметры или погрешности, влияют на точность и достоверность математических моделей.

Количественное представление результатов процесса (выходных параметров) описывается зависимыми или объясняемыми переменными. Поскольку количество выходных параметров в процессах механической обработки достаточно велико, математические модели являются многомерными [4]. Анализ результатов исследований, проводимых в области теории резания металлов и технологии механической обработки, показывает, что наиболее распространенным методом функционального математического моделирования является регрессионный анализ.

Как правило, говоря о регрессионных моделях, называют три основных спецификации (табл. 1), при этом в технике наиболее часто используют мультипликативные степенные модели вида (2).

1. Основные спецификации регрессионных моделей

Спецификация модели	Тип модели	Общий вид модели
Линейная (полиномиальная)	аддитивная	$R = A_0 \cdot \sum_j A_j \cdot \Phi_j$ (1)
Степенная	мультипликативная	$R = A_0 \cdot \prod_j \Phi_j^{A_j}$ (2)
Показательная (экспоненциальная)	мультипликативная	$R = A_0 \cdot \prod_j A_j^{\Phi_j}$ (3)

Примечания: R – количественная оценка каждого наблюдаемого результата процесса обработки (зависимая переменная или функция отклика); j – индекс суммирования или перемножения ($j \in [1; n]$, где n – количество технологических или иных факторов, статистически значимо влияющих на результат процесса (количество независимых переменных, определяющих размерность координатного пространства модели); Φ_j – количественная оценка каждой независимой переменной; A_j – параметр модели, отражающий степень влияния соответствующей независимой переменной на функцию отклика – коэффициент регрессии « Φ_j на R »; A_0 – параметр модели, комплексно отражающий влияние неучтенных в модели факторов, совокупное влияние всех погрешностей и размерности физических величин функции отклика и независимых переменных – постоянная регрессии.

Заметим, что расчетные регрессионные зависимости вида (2) в сочетании с таблицами значений параметров модели (показателей степеней и постоянных регрессии) традиционно составляют содержание технологической справочной литературы [6, 7]. Особенностью традиционных справочных данных [6] является использование в качестве независимых переменных только элементов режима обработки (глубина резания; скорость подачи; скорость резания).

Постоянная регрессии определяется усреднено для сочетания «типовых» конструкционного и инструментального материалов, на-

пример, «сталь 45 – твердый сплав Т15К6» и типовой геометрии режущей части инструмента. Некоторые отличия в свойствах и химическом составе материалов контактной пары, измененная геометрия инструмента, условия охлаждения и т.д. компенсируются набором корректирующих коэффициентов. Относительная погрешность таких моделей для определенных групп конструкционных материалов может составлять, по данным проф. Плотникова А.Л. и других исследователей, до 40...60 %.

На современном этапе изучения процессов механической обработки вариативность

свойств материалов заготовки и инструмента и другие особенности процесса обработки рекомендуется реализовывать в математических моделях за счет введения дополнительных независимых переменных, значения которых определяются оперативно, непосредственно в производственных условиях. В качестве таких входных параметров моделей можно рассматривать, например, теплофизические [3, 8] или физико-механические [3] свойства инструментального и конструкционного материалов или комплексные критерии, определяемые на стадии входного контроля и подготовки производства [8]. Такой подход позволяет оперативно учитывать переменные производственные условия при назначении режимов обработки. Исследования в области адаптивного управления процессами механической обработки активно проводятся представителями Брянской [10], Волгоградской [3, 8, 11] и ряда других технологических научных школ.

Формальные требования к факторам для построения функциональных моделей

Ранее [5, 9] мы подробно обсуждали ограничения, выполнение которых позволяет минимизировать погрешности при построении регрессионной модели и обеспечить возможность содержательного анализа значимости каждого рассматриваемого фактора на результат функционирования системы. Тезисно отметим здесь основные положения:

- трудоемкость экспериментальных исследований определяется спецификацией модели и количеством независимых переменных; для степенных моделей минимальное количество экспериментов определяется соотношением 3^n ; каждый из экспериментов повторяется не однократно; количество повторений в эксперименте определяется заранее заданной доверительной вероятностью и условиями проведения исследований;

- условия функционирования моделируемой системы описываются комплексом попарно взаимно независимых объясняющих переменных; каждое рассматриваемый фактор является (см. рис. 1) [5] управляемым;

- для всех переменных модели – и аргументов, и функции отклика – выполняется комплекс условий Гаусса-Маркова [5], требующий, чтобы масштабные шкалы всех переменных модели были одинаковыми.

Корректное выполнение первых двух положений определяется только организацией проведения экспериментальных исследований

функционирования моделируемой системы.

Для выполнения формальных условий Гаусса-Маркова необходима первичная обработка всей числовой информации, накопленной при проведении экспериментов. Каждая из переменных исходной (см. табл. 1, (1) – (3)) модели имеет уникальный диапазон варьирования размерных значений, причем собственными абсолютными значениями переменных могут различаться на несколько порядков. С учетом нелинейности степенных (2) и показательных (3) исходных моделей, следует говорить о неортогональном и несимметричном координатном пространстве модели. Корректное сравнение факторов по степени влияния на функцию отклика для моделей, построенных с нарушением названных условий – невозможно.

Исходя из сказанного, обязательным этапом построения модели является нормирование числовых значений факторов и самой функции отклика.

Рассмотрим начальные этапы построения функциональной регрессионной модели процесса полустационарного продольного точения. Постоянные условия процесса: заготовка из стали 40Х; глубина резания 0,5 мм; обработка без охлаждения. Функция отклика: тангенциальная составляющая силы резания P_z . Управляемые факторы: скорость резания (Φ_1) – значение изменяется в пределах 90...180 м/мин; коэффициент теплопроводности режущей части инструмента (Φ_2) – 11 Вт/м·К (твердый сплав ТН20), 27 Вт/м·К (твердый сплав Т15К6), 50 Вт/м·К (твердый сплав ВК6); скорость подачи (Φ_3) – значение изменяется в пределах 0,083...0,256 мм/об; твердость обрабатываемой заготовки (Φ_4) варьируется за счет термической обработки от НВ 160 до НВ 240.

Переменные условия и результаты процесса приведены в табл. 2.

Для оценки попарной взаимной независимости рассматриваемых факторов рассчитываем коэффициенты парной корреляции (табл. 3) [5].

Поскольку значения коэффициентов корреляции «фактор-фактор» равны нулю, делаем вывод о том, что рассматриваемые факторы являются попарно взаимно независимыми. Ни один из коэффициентов корреляции «фактор-функция отклика» нулю не равен. Следовательно, модель может быть построена.

Для выполнения условий Гаусса-Маркова выполним логарифмическое нормирование (5) рассматриваемых переменных (табл. 4).

$$X_j = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Phi_j}{\Phi_j^{\min} - 0,05(\Phi_j^{\max} - \Phi_j^{\min})}\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_j^{\max} + 0,05(\Phi_j^{\max} - \Phi_j^{\min})}{\Phi_j^{\min} - 0,05(\Phi_j^{\max} - \Phi_j^{\min})}\right)} - 1; \quad Y_j = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{R}{R^{\min} - 0,05(Y^{\max} - R^{\min})}\right)}{\ln\left(\frac{R^{\max} + 0,05(Y^{\max} - R^{\min})}{R^{\min} - 0,05(Y^{\max} - R^{\min})}\right)} - 1. \quad (5)$$

Модель, отражающая влияние технологических условий обработки (скорость резания v ; фактор Φ_1 ; норма X_1 и скорость продольной подачи S ; фактор Φ_3 ; норма X_3), физико-механических свойств материала инструмента (коэффициент теплопроводности λ ; фактор

Φ_2 ; норма X_2) и заготовки (твердость HB; фактор Φ_4 ; норма X_4) на тангенциальную составляющую силы резания Pz (R , норма Y) показана в нормированном (6) и восстановленном в реальном масштабе (7) виде:

$$Y = 0,005 - 0,026 \cdot X_1 - 0,007 \cdot X_2 + 0,68 \cdot X_3 + 0,12 \cdot X_4, \quad (6)$$

$$Pz = 364,7 \cdot \frac{S^{0,62} \cdot HB^{0,24}}{v^{0,04} \cdot \lambda^{0,05}}. \quad (7)$$

2. Условия и результаты экспериментов (фрагмент плана эксперимента 3⁴)

№	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	R
1	90	11	0,083	160	189
2	135	11	0,083	160	192
3	180	11	0,083	160	204
...					
41	135	27	0,166	200	286
...					
79	90	50	0,256	240	423
80	135	50	0,256	240	403
81	180	50	0,256	240	375

3. Оценка взаимной независимости факторов

$R_{xy} = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$	Φ_2	Φ_3	Φ_4	R	
	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0419	Φ_1
		0,0000	0,0000	-0,1019	Φ_2
			0,0000	0,9715	Φ_3
			0,1388	Φ_4	

4. Нормирование переменных модели

	Исходные (реальные) значения					Нормированные значения				
	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	R	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
минимум	81,00	9,90	0,07	144,00	155,70	-1	-1	-1	-1	-1
максимум	198,00	55,00	0,28	264,00	520,30	1	1	1	1	1
среднее	139,50	32,45	0,18	204,00	338,00	0,22	0,38	0,31	0,15	0,28

Вероятностная оценка адекватности модели, определяемая соотношением стандартного отклонения статистической выборки без учета закономерности и стандартной ошибки модели, рассчитана по критерию Фишера [5] и составляет более 99 %, что позволяет сделать заключение о статистической значимости выделенной закономерности. Относительная по-

грешность модели, не превышающая 13,5 %, в среднем равна 5,2 %. Такая погрешность допустима в инженерных расчетах.

Степенная зависимость (7) является инструментом для количественного прогнозирования результатов обработки при заданных в пределах, определенных при создании модели, условиях. Анализ степени влияния технологи-

ческих условий на результат по размерной модели невозможен, поскольку зависимость (7) «чувствительна» к размерности физических величин, входящих в нее. Интервалы варьирования переменных модели (7), равно как и размерности переменных – и независимых, и функции отклика, – в неявном виде входят в постоянную регрессии (множитель 364,7).

Переменные нормированной модели (6) представляют собой «математические», безразмерные, величины, имеющие единую масштабную шкалу – интервалы варьирования в

пределах [-1; +1] – следовательно, значения этих величин можно сравнивать между собой. Коэффициенты регрессии A_j нормированной полиномиальной модели численно равны частным производным [4, 5] функции отклика Y по каждой из независимых переменных модели X_j (8), следовательно, они определяют степень (по абсолютной величине) и характер (по знаку – возрастание / убывание) влияния (рис. 3) независимых переменных на функцию отклика.

$$A_1 = Y'_{X_1} = -0,026; \quad A_2 = Y'_{X_2} = -0,07; \quad A_3 = Y'_{X_3} = +0,068; \quad A_4 = Y'_{X_4} = +0,12. \quad (8)$$

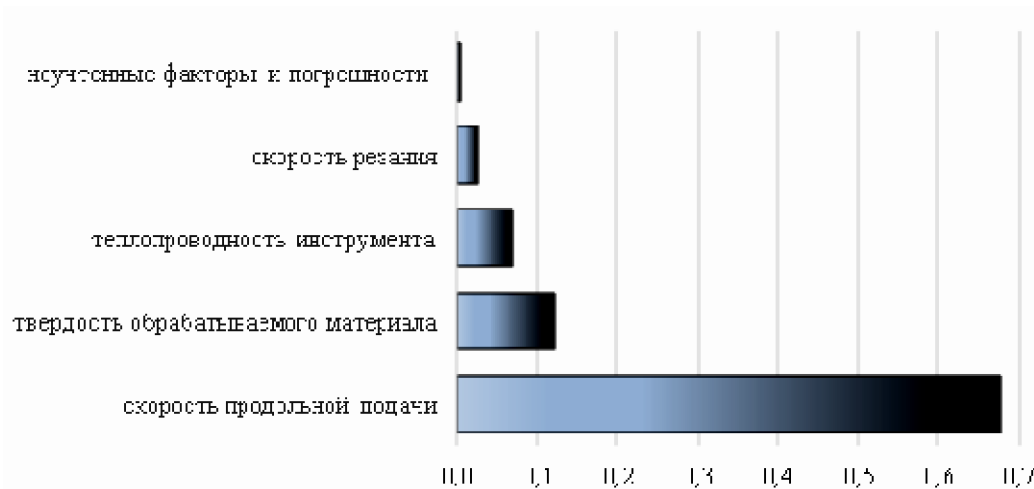


Рис. 3. Влияние условий обработки на величину тангенциальной составляющей силы резания

О статистической значимости выявленной закономерности свидетельствует малая величина постоянной регрессии $A_0 = +0,005$, отражающей степень влияния неучтенных при моделировании факторов и случайных погрешностей – значение A_0 отличается от остальных параметров модели в 5 – 140 раз.

В качестве промежуточного вывода сформулируем тезис о необходимости построения регрессионных моделей процессов механической обработки в нормированном виде. В этом случае технолог получает инструмент для первичного количественного анализа корреляционных связей входных параметров и результатов функционирования технической системы. Следовательно, возможен обоснованный функциональный выбор параметра регулирования для построения системы оперативного управления процессом обработки и, соответственно, технологической системой.

Функциональный выбор регулирующего фактора для оперативного управления

Факторы, влияющие на эффективность

функционирования технологической системы в целом и на эффективность подсистемы «процесс обработки» в частности, могут быть разделены [5, 11] на несколько (см. рис. 2) классов.

– Входные контролируемые факторы, которые могут быть использованы при формировании комплекса условий обработки в качестве условно постоянных величин – оперативное регулирование процесса с помощью таких параметров невозможно: номинальные характеристики материала заготовки и режущего инструмента; геометрия режущего инструмента; номинальная величина припуска заготовки; жесткость технологической системы; элементы режимов обработки, не используемые в качестве управляющих воздействий в силу малой степени влияния на функцию отклика.

– Входные управляемые факторы (управляющие воздействия), которые могут быть изменены в соответствии с алгоритмом управления непосредственно в процессе функционирования системы: элементы технологиче-

ского режима обработки, характеризуемые большой степенью влияния на функцию отклика: скорость подачи, скорость резания, в ряде случаев – глубина резания и условия охлаждения, – если математическая модель учитывает такие параметры в качестве независимых переменных, во-первых. И, во-вторых, если такое управляющее воздействие осуществимо технически.

– Входные неконтролируемые факторы (возмущающие воздействия, случайные погрешности), т.е., параметры, которые влияют на функционирование системы, но не могут быть измерены и использованы для управления системой, либо параметры, не учитываемые алгоритмом управления (математической моделью) в силу «исчезающе малой» степени влияния на функцию отклика: неконтролируемые изменения жесткости технологической системы; случайные (но в пределах допустимых) колебания характеристик материалов заготовки и инструмента; нестабильность размеров заготовки и др.

– Выходные параметры, характеризующие текущее состояние подсистемы «процесс обработки» (параметры регулирования), функционально зависящие от входных параметров. Численные значения параметров регулирова-

ния могут быть определены (измерены) с помощью различных сенсорных устройств. К этой группе следует отнести: эффективную мощность резания; силы резания (суммарно или по осям движения); частоту и амплитуду вибраций элементов технологической системы или иные акустические сигналы; температуру в зоне резания или сигнал термоЭДС и др.

– Выходные параметры, характеризующие результаты обработки, в том числе показатели эффективности функционирования технологической системы. Численные значения таких параметров могут быть определены после завершения процесса обработки: геометрические параметры обработанного изделия; микрогеометрия и физико-механические характеристики поверхностного слоя; производительность и затраты на обработку и т.д.

Отметим, что параметры регулирования в общей классификации выполняют двойственную функцию (рис. 4). С точки зрения контроля процесса обработки, они являются выходными параметрами, находящимися в определенной функциональной взаимосвязи с входными управляемыми, контролируемыми и неконтролируемыми факторами.



Рис. 4. Две группы выходных параметров, характеризующих функционирование технологической системы

Эти же параметры регулирования являются входными данными для определения конечных результатов обработки: показателей геометрической точности и качества поверхно-

стей изделия и показателей эффективности работы технологической системы.

Необходимость использования «двухзвенной» структурной схемы определяется техни-

ческой сложностью, а чаще невозможностью, практической реализации средств контроля выходных параметров функционирования технологической системы:

- функциональные зависимости (см. рис. 4, 0) между входными и выходными параметрами функционирования технологической системы, количественные оценки которых невозможно получить непосредственно в процессе обработки, заменяются двумя группами («звеньями») математических моделей;

- первое звено (см. рис. 4, I) определяет функциональные взаимосвязи между входными параметрами технологической системы и выходными параметрами процесса обработки, значения которых можно измерить непосредственно в процессе обработки – параметрами регулирования;

- второе звено (см. рис. 4, II) определяет взаимосвязи между параметрами регулирования и выходными параметрами функционирования технологической системы.

Требуемые количественные показатели эффективности функционирования технологической системы обеспечиваются стабильными значениями параметров регулирования (зависимости II, рис. 4). Для оперативного управления технологической системой в группе входных параметров технологической системы необходимо выбрать управляющее воздействие (зависимости I, рис. 4), посредством которого обеспечивается стабилизация параметра регулирования непосредственно в процессе обработки.

В качестве управляющего воздействия рекомендуется использовать управляемый входной фактор, степень влияния которого на выходные параметры функционирования техно-

логической системы и на параметры регулирования является максимальной.

Практическая реализация систем оперативного управления механической обработкой

Рассмотрим пример реализации системы оперативного управления токарной обработкой. Материал заготовки – сталь 40X; технологический переход – точение чистовое; глубина резания 0,5 мм. Контролируемые показатели качества обработки: среднее арифметическое отклонение профиля Ra (9) и средний шаг неровностей профиля Sm (10). Параметр регулирования: тангенциальная составляющая силы резания Pz (11). Управляющее воздействие – скорость продольной подачи S , определено по степени влияния на выходные параметры функционирования технологической системы.

$$Ra = 4520,9 \cdot S^{1,08} \cdot v^{-0,32} \cdot \lambda^{0,31} \cdot HB^{-1}, \quad (9)$$

$$Sm = 1,65 \cdot S^{0,87} \cdot v^{-0,13} \cdot \lambda^{0,11} \cdot HB^{-0,03}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) выражаем управляющее воздействие через выходные параметры технологической системы – зависимости (11) и (12), соответственно.

$$S = \left(\frac{Ra}{4520,9 \cdot v^{-0,32} \cdot \lambda^{0,31} \cdot HB^{-1}} \right)^{0,93}, \quad (11)$$

$$S = \left(\frac{Sm}{1,65 \cdot v^{-0,13} \cdot \lambda^{0,11} \cdot HB^{-0,03}} \right)^{1,15}. \quad (12)$$

Из выражений (9) и (10) выражаем управляющее воздействие через выходные параметры технологической системы – зависимости (12) и (13), соответственно.

$$Pz = 1,227 \cdot 10^6 \cdot S^{0,22} \cdot v^{-1,25} \cdot \lambda^{0,02} \cdot HB^{-0,004}. \quad (13)$$

Подставив значение параметра S (11), (12) в зависимость (13), получим математические модели оперативного управления качеством обработки. Контроль постоянства составляющей силы резания Pz и управление стабильностью Pz через значение скорости продольной подачи S обеспечивает поддержание микрогеометрических параметров обработанной поверхности в заданных пределах.

Выводы

1. Для построения алгоритмов оперативного управления процессами механической об-

работки целесообразно использовать регрессионные модели, отражающие функциональные взаимосвязи между входными и выходными параметрами процессов обработки и технологической системы в целом. Корректный количественный анализ функциональных взаимосвязей возможен при условии нормирования входных и выходных параметров при построении регрессионных моделей.

2. Техническая реализация оперативного управления технологической системой возможна при переходе от функциональных моделей вида «входные параметры технологической системы – выходные параметры техно-

гической системы» к двухзвенной структуре вида «входные параметры технологической системы – параметры регулирования – выходные параметры технологической системы».

3. В качестве управляющего воздействия рекомендуется использовать управляемый входной фактор, степень влияния которого на выходные параметры функционирования технологической системы и на параметры регулирования является максимальной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **План мероприятий** («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы: прил. № 1 к протоколу. Протокол заседания Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 14.02.2017 г. – 2017. – № 1. – 117 с.
2. **Ингеманссон, А.Р.** Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2018. – № 8 (86). – С. 25-32
3. **Ингеманссон, А.Р.** Повышение эффективности обработки резанием за счет адаптивного управления в цифровых производственных системах // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2020. – № 4 (106). – С. 39-48
4. **Мышкис, А.Д.** Элементы теории математических моделей. – 3-е изд., испр. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
5. **Чигиринская, Н.В., Чигиринский, Ю.Л., Горобцов, А.С.** Моделирование неперiodических стохастических процессов: учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2019. – 108 с.
6. **Справочник технолога-машиностроителя**. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 496-656
7. **Справочник технолога** / под общ. ред. А.Г. Сулова / М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
8. **Тихонова, Ж.С.** Рациональное использование твердосплавного инструмента с покрытием при токарной обработке заготовок путём диагностирования его режущих свойств: дисс. канд. техн. наук по специальности 05.02.07. – Волгоград: ВолгГТУ, 2021. – 148 с.
9. **Чигиринский, Ю.Л., Чигиринская, Н.В.** Анализ методов статистического моделирования в теории резания // *Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении: материалы XII междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации технологов-машиностроителей*. – Тамбов, 2020. – С. 39-44.
10. **Научно-технические технологии в машиностроении: монография** / А.Г. Сулов и др. / под ред. А.Г. Сулова / М.: Машиностроение, 2012. – 527 с.

11. **Чигиринский, Ю.Л., Нестеренко, П.С.** К вопросу выбора параметра регулирования в системах адаптивного управления процессом резания // *Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*. – 2016. – №14 (193). – С. 46-48.

REFERENCES

1. *Action Plan (“Roadmap”) “Technet” (Advanced Production Technologies) of National Technological Initiative: App. No.1 to Protocol. Meeting Protocol of Presidential Council of the RF on Economy Modernization and Innovation Development of Russia of 14.02.2017.* – 2017. – No.1. – p. 117.
2. Ingemansson, A.R. Characteristic, structure, operation mechanisms and modern aspects of introduction of digital production systems in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.8 (86). – PP. 25-32.
3. Ingemansson, A.R. Cutting effectiveness increase due to adaptive control in digital production systems // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.4 (106). – PP. 39-48.
4. Myshkis, A.D. *Elements of Mathematical Model Theory*. – 3-d edition revised. – M.: KomKniga, 2007. – p. 192.
5. Chigirinskaya, N.V., Tchigirinsky, J.L., Gorobtsov, A.S. *Modeling of Non-periodic Stochastic Processes: manual*. – Volgograd: VolgSTU, 2019. – p. 108.
6. *Technologist-Mechanician’s Reference Book*. In 2 Vol. / under the editorship of A.G. Kosilova and Meshcheryakov / 4-th edition revised and supplemented. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – PP. 496-656.
7. *Technologist’s Reference Book* / under the general editorship of A.G. Suslov / M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019. – p. 800.
8. Tikhonova, Zh.S. *Efficient Use of Hard-alloy Tool with Coating at Blank Turning through Diagnostics Its Cutting Properties: Can. Sc. Tech. thesis on Specialty 05.02.07.* – Volgograd: VolgSTU, 2021. – p. 148.
9. Tchigirinsky, J.L., Chigirinskaya, N.V. Analysis of methods for statistical modeling in cutting theory // *Innovation Technologies in Transport and Chemical Mechanical Engineering: Proceedings of the XII-th Inter. Scientific-Tech. Conf. Technologist-Mechanician Association*. – Tambov, 2020. – PP. 39-44.
10. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering: monograph* / A.G. Suslov et al. / under the editorship of A.G. Suslov / M.: Mechanical Engineering, 2012. – p. 527.
11. Tchigirinsky, J.L., Nesterenko, P.S. To the problem of control parameter choice in systems of adaptive cutting control // *VolgSTU Proceedings Efficient Technologies in Mechanical Engineering Series*. -2016. – No.14 (193). – PP. 46-48.

Рецензент д.т.н.
Дмитрий Иванович Петрешин