

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Нечеткие методы можно применять совместно с традиционными алгоритмами управления, используя наилучшие черты различных подходов для создания новых эффективных систем управления технологическими процессами. В статье приведено описание адаптивной системы управления технологическим процессом обработки деталей на оборудовании с числовым программным управлением, основанной на теории нечетких множеств.

Обработка на металлорежущих станках протекает при непрерывном изменении внешних условий и параметров динамической системы станка. Описания процессов, происходящих при обработке, получены либо теоретически при использовании соответствующих допущений, либо эмпирически на основании статистической обработки результатов экспериментов для наиболее типичных случаев. Эти зависимости не учитывают всего многообразия факторов, действующих в реальных условиях в каждый данный момент времени[1].

Наличие жесткой программы, предписывающей исполнение фиксированных траекторий и режимов резания, зачастую ведет к снижению производительности, так как при программировании не могут быть учтены особенности обработки каждой детали и расчет ведется по среднестатистическим данным, причем исходные граничные условия должны выбираться по наихудшим вариантам. Нередки случаи, когда запрограммированная технология (режимы резания и траектория перемещения инструмента) оказывается непригодной, например, из-за плохого схода стружки; при этом неизбежны переделки программы. Эти недостатки не исключаются даже при использовании систем с ЧПУ[2].

Чтобы преодолеть эти недостатки необходимо наличие системы управления, которая позволит оптимизировать процесс обработки каждой детали благодаря использованию текущей информации по параметрам, определяющим условия и качество процесса резания. Данную информацию можно получать с помощью датчиков обратной связи в ходе процесса резания. Также система управления должна иметь блок самопрограммирования режимов резания, т.е. блок назначения оптимальных режимов резания при вариации условий обработки в самых широких пределах, что позволит улучшить процесс обработки деталей[3].

Задачу построения такой системы управления можно определить как задачу самопрограммирования с оптимизацией обработки и ее решение возможно на основе методов адаптивного управления, где блок самопрограммирования режимов резания может быть эффективно реализован с привлечением математических методов теории нечетких множеств.

Традиционным способом построения эффективной автоматизированной системы контроля и управления, а так же алгоритма ее функционирования является создание структурной модели компонентов технологического процесса МК, позволяющей управлять точностью технологического процесса и учитывать возникающие в процессе обработки деталей, возмущающие воздействия.

На рисунке 1 представлена IDEF0 диаграмма технологического процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ в виде набора взаимодействующих и взаимосвязанных блоков, отображающих процессы, операции и действия процессов.

Технологический процесс обработки деталей на оборудовании с ЧПУ характеризуется большим количеством входных и выходных параметров представленных на рисунке 2.

Где вектор параметров системы X составляют такие параметры как: t – глубина резания, S_m – подача, V – скорость резания. Совокупность выходных величин системы Y : P_y – сила резания. A – конструктивные особенности, не зависящие от процесса обработки деталей (W – тип используемого инструмента, G – параметры заготовки и т.д.). Вектор возмущающих воздействий ϵ .

Схема компонентов технологического процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ представлена на рисунке 3. На ней показаны основные компоненты технологического процесса обработки деталей на металлообрабатывающем станке.

Основными составляющими структурной модели технологического процесса являются система настройки инструмента S_u , система настройки оборудования S_o , система управления S_{cy} и структура изготавливаемой детали P_d .

$$MK = M(S_u, S_o, S_{cy}, P_d). \quad (1)$$

Система настройки инструмента S_u позволяет определить предварительные значения параметров режима резания, необходимые для управления точностью технологического процесса

$$S_u = M(t, S, V, P_y), \quad (2)$$

где t – глубина резания в мм, S – подача в мм/об, V – скорость резания в м/мин, P_y – сила резания в кГ.

Глубина резания t определяется

$$t_{np} = Pr - t_{ок}, \text{ мм.} \quad (3)$$

где Pr – припуск на обработку, $t_{ок}$ – глубина резания при окончательной обработке

$t_{ок} = 0,125R_a^{1,2}$, где $R_a^{1,2}$ – требуемая шероховатость обработанной поверхности.

Скорость резания V находится

$$V = \frac{C_p}{QmtxSy} K_p, \text{ м/мин} \quad (4)$$

где C_p – общий коэффициент, зависящий от рода обрабатываемого материала, от вида обработки, инструментального материала и других параметров; Q – стойкость инструмента, определяется по нормативам x, y, m – показатели степени при параметрах режимов резания; K_p – поправочный коэффициент.

Сила резания определяется

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} S^{y_{py}} v^{z_{py}} K_p, \quad (5)$$

где n – показатель степени при параметре скорости резания

Подставив (3,4, 5) в (1) получим

$$S_u = (t, S, V, P_y). \quad (6)$$

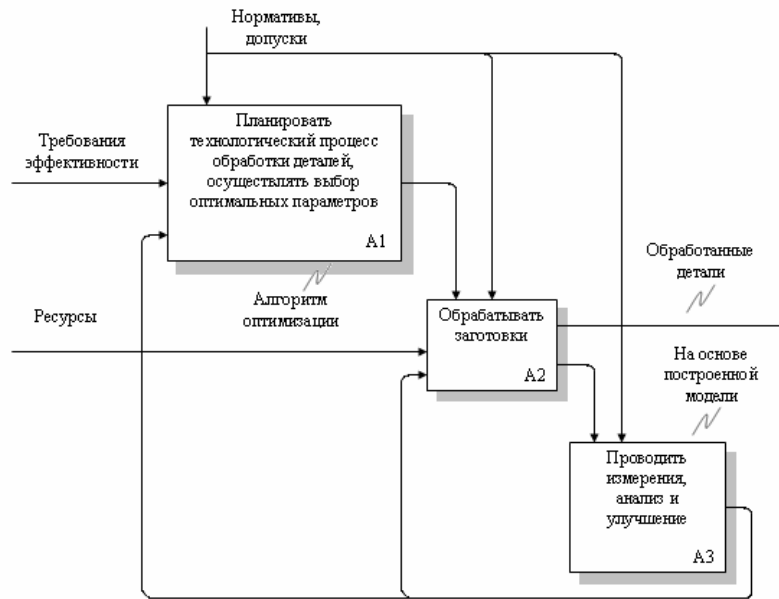


Рисунок 1. Диаграмма процессов IDEF0.



Рисунок 2. Параметры технологического процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ.

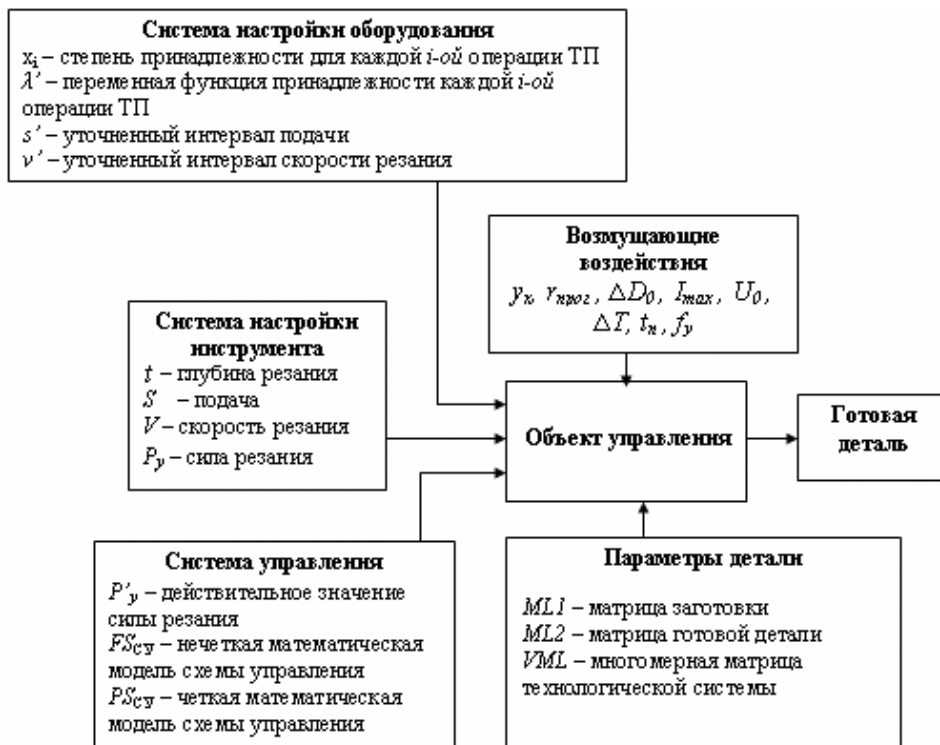
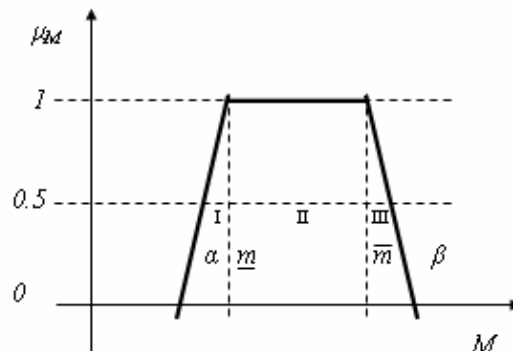


Рисунок 3. Схема компонентов технологического процесса обработки деталей.

Рисунок 4. Зависимость функции принадлежности μ_M от нечеткого множества M .

Технологическая операция обработки деталей машин определяется прохождением режущего инструмента по поверхности металлической детали, при этом основные параметры регулировки – скорость резания и перемещение режущего инструмента (подача), которые определяют качество деталей [4]. Таким образом, для отдельной операции технологического процесса задача управления точностью обработки деталей сводится к регулировке перемещения исполнительных механизмов оборудования с ЧПУ на заданное расстояние при определенных параметрах режимов резания. Но данная задача осложняется тем, что при определении исходных данных, управляющих перемещением исполнительных приводов оборудова-

ния с ЧПУ, таких как глубина, подача и скорость резания, задача выбора экспертом точных значений этих параметров затруднена, так как режимы резания, определяемые формулами (3) и (4) попадают только в диапазон рекомендуемых значений. Поэтому для уточнения и выбора предпочтительных значений режимов резания из рекомендуемого диапазона и последующей передачи их на исполнительные механизмы, предлагается оценивать рекомендуемые диапазоны режимов резания в виде нечетких множеств. Использование нечетких множеств позволяет установить для каждой технологической операции по каждому регулируемому параметру предпочтительную область, которая будет обеспечивать требуе-

мое качество обработки детали и допустимую область, за пределы которой нельзя выходить.

Нечеткие множества записываются в форме стандартных функций принадлежности, преимуществом которых является простота, легкая интерпретация, эффективность в плане вычислений на большинстве аппаратных платформ.

В общем виде нечеткое множество M параметров t, S, V определяется как выпуклая нечеткая величина

$$M = (\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta), \quad (7)$$

где \underline{m}, \bar{m} – нижнее и верхнее модальное значение нечеткого интервала M ; α, β – левый и правый коэффициент нечеткости соответственно.

Зависимость функции принадлежности μ_M от нечеткого множества M представлена на рисунке 4.

Эффективным средством повышения быстродействия нечетких вычислений является применение аппроксимации (L - R) функций, т.е. функций которые принимают вид

$$L = R, \quad (8)$$

и у этих функций равнозначны левая L и правая R части функции принадлежности μ_M . Функции принадлежности μ_M нечеткого множества для (L - R) – аппроксимации показана на выражении приведенном ниже.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} L\left(\left(\frac{m-x}{\alpha}\right)\right), & x \leq \underline{m}, \underline{m}(x) = \left(\frac{m-x}{\alpha}\right) & \alpha > 0 \\ R\left(\left(\frac{m-x}{\beta}\right)\right), & x \leq \underline{m}, \underline{m}(x) = \left(\frac{m-x}{\beta}\right) & \beta > 0 \\ 1, & \text{если } x \in [\underline{m}, \bar{m}] & \subset M. \end{cases}$$

Коэффициенты нечеткости α и β назначаются на этапе обучения системы, как начальное значение α_s и конечное значение β_s рекомендуемых диапазонов подачи $[\alpha_s, \beta_s]$, а α_v и β_v начальное и конечное значение скорости резания $[\alpha_v, \beta_v]$, исходя из рекомендуемых интервалов скорости и подачи резания (3, 4). Нижнее и верхнее значение интервала \underline{m} и \bar{m} принимаются равными минимальному \underline{s} и максимальному \bar{s} значению между разрешенным диапазоном регулирования подач и минимальному \underline{v} и максимальному \bar{v} значению между разрешенным диапазоном регулирования скоростей резания по паспорту станка. Следовательно, нечеткий интервал M для подачи и скорости на i -ой операции технологического про-

цесса будет иметь вид $S_i = (\underline{s}_i, \bar{s}_i, \alpha_s, \beta_s)$ и $V_i = (\underline{v}_i, \bar{v}_i, \alpha_v, \beta_v)$. Для обеспечения требуемого качества технологического процесса нужно выбрать такие значения подачи и скорости, которые будут обеспечивать требуемую точность обработки деталей.

Теперь рассмотрим систему настройки оборудования S_0 подробно. При этом подвывая анализу рабочее место, на котором выполняется i -ая операция технологического процесса

$$S_0 = M(x_i, \lambda, s_i, v_i), \quad (9)$$

где x_i – степень принадлежности для каждой i -ой операции технологического процесса; λ – переменная функция принадлежности для каждой i -ой операции технологического процесса; s'_i – уточненный интервал подачи; v' – уточненный интервал скорости резания.

В задаче регулировки параметров обработки степень принадлежности $x_i \in [\alpha; \beta]$ для каждой i -ой операции с учетом формулы (5) определяется как

$$x_i - S_i \cdot V_i = \frac{P_y}{K_i} \quad (10)$$

где S_i и V_i – значения подачи и скорости для каждой i -ой операции технологического процесса; K_i – величина, зависящая от геометрических характеристик заготовки.

$$K_i = V_n S_i = \frac{P_y}{C_p t^k K_p} \quad (11)$$

Переменная функции принадлежности λ_i для каждой i -ой операции технологического процесса определяется

$$\lambda_i = \lambda' = \mu v_i (v' t) = \mu s t (s' t) \quad (12)$$

Значение переменной функции принадлежности определяется произведением нечетких множеств:

$$\lambda' = \mu V_i \otimes S_i(P_y). \quad (13)$$

Далее значения подачи s'_i и скорости резания v'_i определяются по полученному значению λ' (13). Если λ' равна единице $\lambda' = 1, x_i \in [\underline{m}; \bar{m}]$ (рисунок 4), то будем иметь более одной разрешенной регулировки, для которой всякое увеличение скорости резания приведет к уменьшению подачи и наоборот. Если значение переменной λ' (13) принадлежит интервалу $0, 1 < \lambda' < 1$, то параметры управления s'_i и v'_i определяются в зависимости от того, к какой области I, II или III (рисунок 4) принадлежит значение x_i .

Проведенные исследования показали, что в случае, $\lambda' < 0,1$ качество обработки деталей не соответствует требуемой точности обработки деталей, и размеры обработанных поверхностей выходят за требуемые поля допусков на размер. Отсюда следует, что если величина $\lambda' < 0,1$, то выбранные значения режимов резания не обеспечивают требуемую точность обработки деталей. И конечный вид математической модели оборудования с учетом выражений примет вид, показанный на рисунке 6. При этом λ' определяется по формуле (13), а x_i по формуле (10).

$$Scy = (s'i; v'i). \quad (14)$$

На выражениях, приведенных ниже показаны конечные составляющие системы настройки оборудования:

$$s'_i = \begin{cases} [s_i, \bar{s}_i] \cap \left[\frac{P_y}{K_i \cdot V_i}, \frac{P_y}{K_i \cdot V_i} \right] & \text{если } \lambda' = 1, \text{ при } x_i \in [\underline{m}, \bar{m}]; \\ s_i - \alpha_s \cdot L(\lambda') & \text{если } 0,1 < \lambda' < 1, \text{ при } x_i \in [\alpha, \underline{m}]; \\ s_i - \beta_s \cdot L(\lambda') & \text{если } 0,1 < \lambda' < 1, \text{ при } x_i \in [\underline{m}, \beta]; \\ \text{если } \lambda' < 0,1 \text{ то точность не достигается.} \end{cases}$$

$$v'_i = \begin{cases} [v_i, \bar{v}_i] \cap \left[\frac{P_y}{K_i \cdot s_i}, \frac{P_y}{K_i \cdot s_i} \right] & \text{если } \lambda' = 1, \text{ при } x_i \in [\underline{m}, \bar{m}]; \\ v_i - \alpha_v \cdot L(\lambda') & \text{если } 0,1 < \lambda' < 1, \text{ при } x_i \in [\alpha, \underline{m}]; \\ v_i - \beta_v \cdot L(\lambda') & \text{если } 0,1 < \lambda' < 1, \text{ при } x_i \in [\underline{m}, \beta]; \\ \text{если } \lambda' < 0,1 \text{ то точность не достигается.} \end{cases}$$

В автоматизированной системе управления технологическими процессами достижение требуемой точности обработки деталей обеспечивается варьированием действительного значения силы резания $P'y$, полученных от датчиков активного контроля [5]. Поэтому система управления Scy примет вид

$$Scy = M(P'y, FScy, PScy), \quad (15)$$

где $P'y$ - действительное значение силы резания, $FScy$ - нечеткая модель системы управления, $PScy$ - четкая модель системы управления.

Эталонное значение параметра силы резания P_y определяется на основе уточненных значений режимов резания. Но в реальных условиях обработки от системы активного контроля может поступить сигнал не соответствующий эталонному значению силы резания. В этом случае необходимо изменять значение режимов резания до тех пор, пока действительное значение силы резания $P'y$ не будет соответствовать эталонному значению силы резания P_y .

$$P'y = P_y. \quad (16)$$

Нечеткая модель системы управления.

Пусть заданы множества входных параметров технологического процесса $X = \{t, S\}$ и множество выходных параметров $Y = \{V\}$, т.е. для всех входных параметров определено множество значений выходных лингвистических переменных. Нечеткая математическая модель схемы управления запишется в виде математической модели, основанной на использовании нечеткого логического правила и нечеткого логического вывода

$$FScy = M(NLP, NLV). \quad (17)$$

При этом нечеткое логическое правило определяется как

$$NLP \Rightarrow \text{if } t \text{ and } S \text{ then } V, \quad (18)$$

где t, S, V - нечеткие интервалы уточненных параметров режимов резания. NLP состоит из двух операций "и" и "то". Часть правила "если t и S " определяется операцией пересечения для нечетких интервалов (L-R)-типа

$$t \cap S \Leftrightarrow \mu_c(x) = \mu_{t \cap S}(x) = \min(\mu_t(x), \mu_s(x)). \quad (19)$$

Далее выражение (19) с использованием L-R функций (8) примет вид

$$t \cap S \Leftrightarrow \mu_c(x) = \mu_{t \cap S}(x) = L(t(x), v_s(x)). \quad (20)$$

Процесс достижения требуемой точности обработки деталей выполняется с помощью нечеткого логического вывода, в результате которого вычисляется выходное значение логического правила V' при новом наборе вектора значений входных логических правил $\mu_c(x)$. При этом $\mu_c(x)$ соответствует нечетким подмножествам, $\mu_c: C \rightarrow [0;1]$, а V' выводимому нечеткому соответствию, $\mu_v \in F(Y)$, которое вычисляется с помощью композиционного правила нечеткого логического вывода и определяет вторую часть правила операции "то"

$$NLP = \mu_v = \mu_c * F, \quad (21)$$

где F - нечеткое отношение, определяемое по формуле

$$F = \bigcup \mu_c \times \mu_v. \quad (22)$$

Реализация правила на ЭВМ возможна лишь для малоразмерных моделей, потому что размерность нечеткого отношения F приводит к существенному повышению времени определения нового набора значений вектора входных логических правил. Для уменьшения времени вычислений будем использовать (L-R) функции, тогда μ_v' запишется

$$\mu_v' = L(\wedge (\vee P_{ij}) \vee \dots \vee v_i(y)). \quad (23)$$

В результате вычислений выражение примет вид

$$NLP = L(\bigwedge (\bigvee P_{ij}) \bigvee \dots \bigvee \max(0, 1 - |(m - x)/\alpha|), \quad (24)$$

Это выражение определяет нечеткое значение скорости резания v , а выражение (25) определяет значение нечеткой математической модели схемы управления

$$FScy = L(\bigwedge (\bigvee P_{ij}) \bigvee \dots \bigvee \max(0, 1 - |(m - x)/\alpha|), \quad (25)$$

Четкая модель системы управления.

Передача нечетких значений на исполнительные механизмы оборудования с ЧПУ посредством управляющей программы затруднительно. Отсюда следует, что необходимо провести их дефазификацию. В автоматизированных системах управления в большинстве случаев применяется аппроксимация полученного нечеткого значения нечеткого логического вывода путем вычисления одного наиболее вероятного на универсальном множестве четкого значения управляющего воздействия. В этом случае четкая математическая модель технологического процесса $PScy$ вычисляется так

$$PScy = ((\underline{mv} - x) / \alpha) \bigvee ((x - \overline{mv}) / \beta) \bigvee 0. \quad (26)$$

Таким образом, из выражения (33) получаем четкое значение математической модели схемы управления, которая определяет новый параметр скорости резания v' .

В заключении можно сформулировать принцип управления технологическим процессом обработки деталей с использованием оборудования с ЧПУ.

В случае, когда не выполняется равенство (20), необходимо изменить значение подачи и глубины резания, сформулировав новое нечеткое логическое правило (22) и определить новое четкое значение скорости резания v' . Далее полученные значения глубины резания, подачи и скорости резания подставляем в формулу (5) для определения силы резания, пока не будет выполняться равенство (20). Когда равенство (20) выполнится, рассчитанные значения режимов резания передаются посредством управляющей программы на исполнительные механизмы оборудования с ЧПУ, обеспечивая высокую точность обработки деталей.

С учетом выше приведенных формул модель схемы управления примет вид

$$Scy = (P'_y, FScy, PScy). \quad (27)$$

Где полученные модели $FScy$ (32) и $PScy$ (33) образуют модель схемы управления Scy (34).

На основе предложенных математических моделей технологического процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ, был разработан, реализован и зарегистрирован программно-аппаратный комплекс управления точностью обработки деталей на токарном станке с ЧПУ.

Список использованной литературы:

1. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / М.: Энергоатомиздат, 1988.-221с.
2. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью на металлорежущих станках. - Л.: Машиностроение, 1982. - 184с.
3. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под. ред. А.Н. Гаврилова. - М.: Машиностроение, 1973. - 567с.
4. Коваленко А.В. Точность обработки на станках и стандарты / М.: Машиностроение, 1992. - 160с.
5. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / Под.ред. А.С. Проникова. - М.: Машиностроение, 1982. - 256с.