

УДК 621.9:004.83

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. Ц. Зориктуев¹, Д. Ю. Рубцов², Б. Н. Файрушин³

¹katp07@mail.ru, ²katp07@mail.ru, ³katp07@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступило в редакцию 22.06.2013

Аннотация. Обосновывается методология формирования моделей иерархических интеллектуальных систем управления, на их основе алгоритмов и структур оптимального управления процессами механообработки.

Ключевые слова: многоуровневые интеллектуальные системы управления; внешняя и внутренняя оптимизация процессов механообработки; мехатронные станочные системы; экспертные динамические системы на базе положения об оптимальной температуре резания.

Жесткие требования к параметрам обработанных поверхностей деталей авиадвигателей, низкие показатели обрабатываемости резанием материалов, из которых изготавливаются эти детали, тенденция современного машиностроения к применению автоматизированного оборудования с высокими скоростями движения исполнительных механизмов, обуславливают создание мехатронных станочных систем с высокоэффективными системами управления (СУ) процессами механообработки (резания).

Проблемы создания таких СУ обусловлены сложностью процесса резания (ПР) как объекта управления (ОУ): его многосвязностью, многоканальностью, многорежимностью, малым объемом априорной информации о внутренних и внешних связях, отсутствием или неточностью математического описания, неопределенностью поведения, сильными возмущениями [1].

Сложность создания и управления стохастическим нестационарным объектом управления, каким является процесс резания, в условиях существенной неопределенности требует применения интеллектуальных систем управления [2], теории иерархических многоуровневых систем [3].

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ МЕХАНООБРАБОТКИ

Многообразие требований, предъявляемых к различным свойствам и качествам проектируемой системы, необходимость учета влияния

внешней среды и внутренних возмущающих факторов, требуют необходимости рационального распределения задач, решаемых в процессе управления между составными частями АСУ, т. е. задача управления сложным объектом формируется как иерархическая, многоуровневая.

При формализованном (математическом) описании функционирования автоматизированной системы управления (АСУ) механообработывающим станочным участком (модулем) применение иерархии уровней (страт) описания [3] позволяет решить проблему детального описания функционирования элементов и всей системы с одновременным обеспечением простоты и обзорности. При такой форме система определяется семейством моделей, каждая из которых описывает систему различных уровней абстрагирования. Каждый объект, рассматриваемый на некоторой страте (уровне), более подробно описывается по нижележащей страте. Если на нижней страте рассматривается функционирование отдельных подсистем (элементов), то на верхней – их взаимодействие между собой. За счет изучения взаимодействия элементов (подсистем) на более верхних стратах достигается понимание главных (существенных) задач (целей) и свойств функционирования более крупных подсистем и систем в целом. При переходе описания на вышележащие страты (уровни) происходит укрупнение (агрегирование) информации.

Задачи проектирования АСУ мехатронной станочной системы относятся к сложным проблемам.

Используя принципы построения иерархических интеллектуальных СУ сложными объектами управления, каким является процесс механообработки, работающих в условиях существенной неопределенности, и полученные в УГАТУ теоретические и практические результаты по оптимальному управлению процессами резания (ПР) предлагается методика построения многоуровневой модели СУ станочного модуля (рис. 1).

В методике отражается двухэтапность оптимизации процесса механообработки. Первый этап (внешняя оптимизация) осуществляется на верхнем (третьем) уровне 3-уровневой СУ. Второй этап (внутренняя оптимизация) проводится на II и I уровнях СУ.

Алгоритмы функционирования и структура системы управления создаются на основе функ-

циональных моделей, построенных по методологии IDEFO [5].

Функциональные модели разрабатываются с учетом вышеназванных черт иерархической СУ и особенностей процесса резания (ПР) как сложного объекта управления и современного состояния математического, информационного, программного, алгоритмического обеспечения интеллектуальных СУ таких объектов [4–6].

Верхний (третий в рассматриваемом случае) уровень является организующим в интеллектуальном управлении. Здесь происходит преобразование сложных качественных (но неточных) команд в последовательность более детальных и более конкретных распоряжений для второго уровня СУ. Задачей этого уровня является также организация связи с вышерасположенными уровнями АСУ ТП.

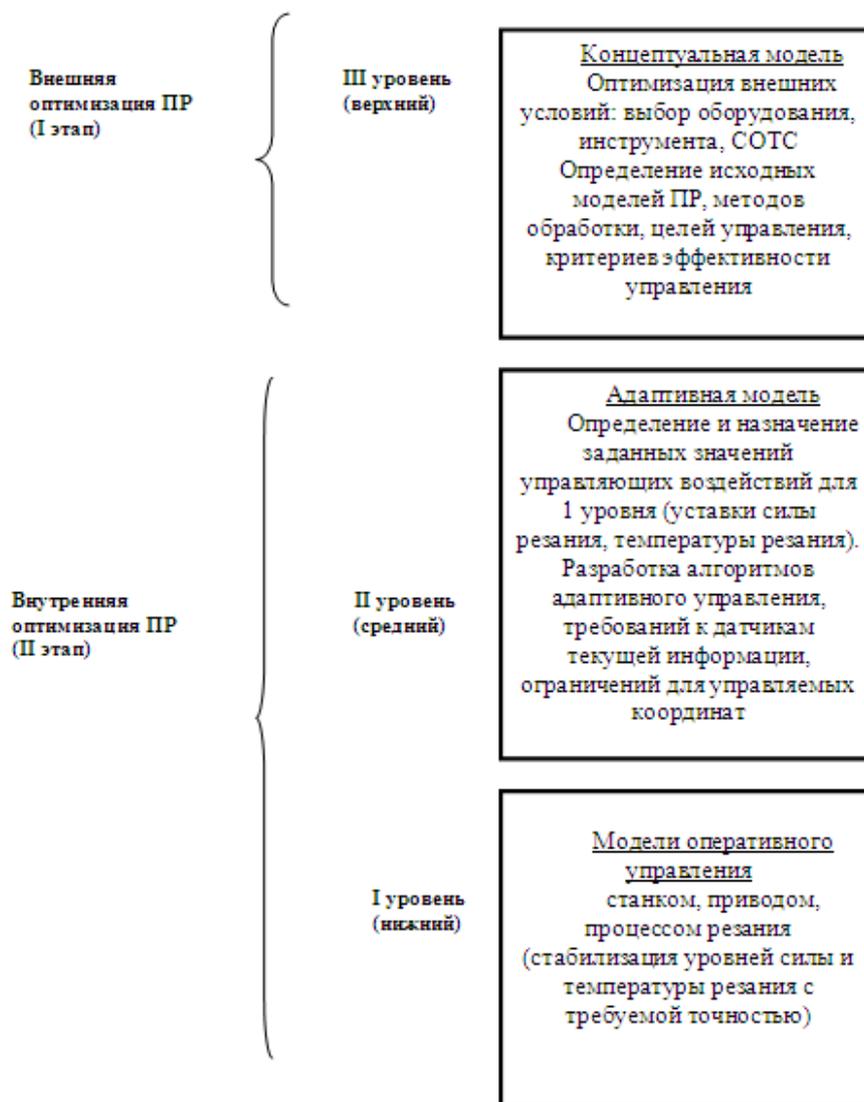


Рис. 1. Многоуровневая модель СУ станочным модулем

На этом уровне осуществляется так называемая внешняя оптимизация ПР: выбор оборудования, режущего инструмента, методов обработки, контроля, диагностики состояния элементов системы. Здесь формируются исходные модели процесса резания в библиотеке моделей (в составе банка данных). Для СУ станочным модулем это могут быть модели вида [1, 4, 6]:

$P_z, V, \theta(E), R_z(R_a), \sigma, N, h_c = f(S_g, s, t, r, \varphi, \text{СОТС});$

$h_{oz} = f(v, s, t); h_z = f(G, v, s, t). G = f(\text{геометрические параметры контактных поверхностей режущего инструмента, электрические и механические свойства контактируемых материалов}).$

$h_3 = f(\text{время, путь резания}),$

$h_{3n}, h_{3n}, G_n, l_n = f(\text{время резания, } \gamma', v).$

На основе рассмотренных задач и методов оптимизации верхнего уровня СУ обосновывается обобщенная функциональная модель этого уровня для СУ станочным модулем (рис. 2).

Внутренняя (текущая) оптимизация осуществляется на II и I уровнях СУ (рис. 1).

На втором (среднем) уровне СУ определяются уровни задающих воздействий и ограничений контролируемых регулируемых координат (т. е. уставок сил и температур резания; предельные значения скорости резания, подачи, глубины резания и т. д.).

Здесь на основе текущей информации об износе, силе и температуре резания, поступающей с I уровня, ведется параметрическая и структурная идентификация модели и вместе с устройствами III уровня производится процесс обучения (адаптация) при изменении внешних условий обработки.

Точность команд на этом уровне выше, чем на предыдущем (верхнем) уровне СУ.

Рассмотренные задачи II уровня СУ и требования к этому уровню позволяют сформировать функциональную модель этого уровня (рис. 3).

Первый (нижний) уровень многоуровневой СУ станочным модулем определяет качество изготовления продукции и экономическую эффективность всей системы. Эта значимость определяется тем, что через этот уровень проходит основной поток силовой энергии и здесь создается и формируется текущая информация, характеризующая состояние основных элементов системы, в том числе объекта управления.

САУ станком, приводом должна обеспечивать оптимальное управление процессом резания, функционирование всех элементов, обеспечивающих требуемый режим обработки. На этом уровне должна формироваться необходи-

мая текущая информация о состоянии управляемого объекта, технологического оборудования, измерительной и диагностирующей аппаратуры, которая может целенаправленно использоваться на более верхних уровнях.

Для обеспечения требуемых условий производительности, обеспечения необходимых параметров качества обработки на нижнем уровне управления станочным модулем необходимо формировать алгоритм функционирования и структуру СУ по стабилизации сил и температур резания на заданном уровне с требуемой точностью.

С учетом требований к СУ на нижнем уровне управления и особенностью динамики ПР, как объекта управления, формируется функциональная модель нижнего уровня СУ станочным модулем (рис. 4).

На основе разработанных функциональных моделей каждого уровня строится обобщенная функциональная модель трехуровневой СУ (рис. 5).

Разработанные функциональные модели (рис. 2–5) являются основой построения алгоритмов функционирования, алгоритмов и структур систем управления, принципов построения интеллектуальных систем управления, позволяющих обеспечить алгоритмы самообучения, самоорганизации при оптимизации технологических процессов механообработки.

НЕЧЕТКИЕ НЕЙРОННЫЕ (ГИБРИДНЫЕ) СЕТИ КАК МОДЕЛИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИМИ СТАНКАМИ

Многорежимность, многомерность, существенная неопределенность, громоздкость детерминированных моделей процессов механообработки как объекта управления делает практически трудным применение классических методов управления, в том числе с эталонной моделью, использование классических наблюдателей состояния системы.

В этих условиях эффективно применение гибридных – нечетких нейронных сетей, в которых выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, но соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей [2, 8].

Наиболее распространена архитектура нечетких нейронных сетей – сети прямого распространения сигнала особого типа.

Подобная архитектура носит название ANFIS – Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (адаптивная сеть нечеткого вывода).

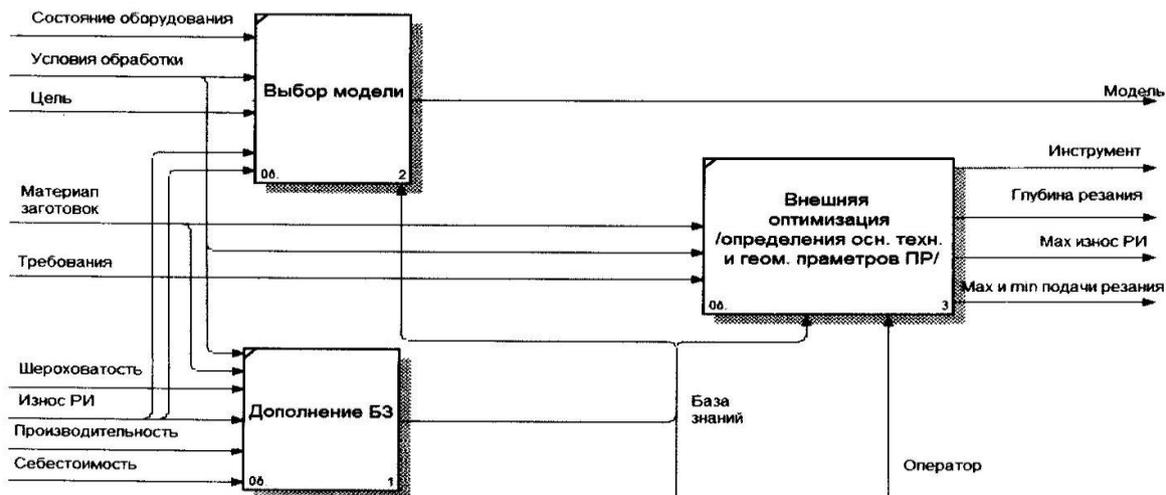


Рис. 2. Функциональная модель верхнего (третьего) уровня СУ станочным модулем

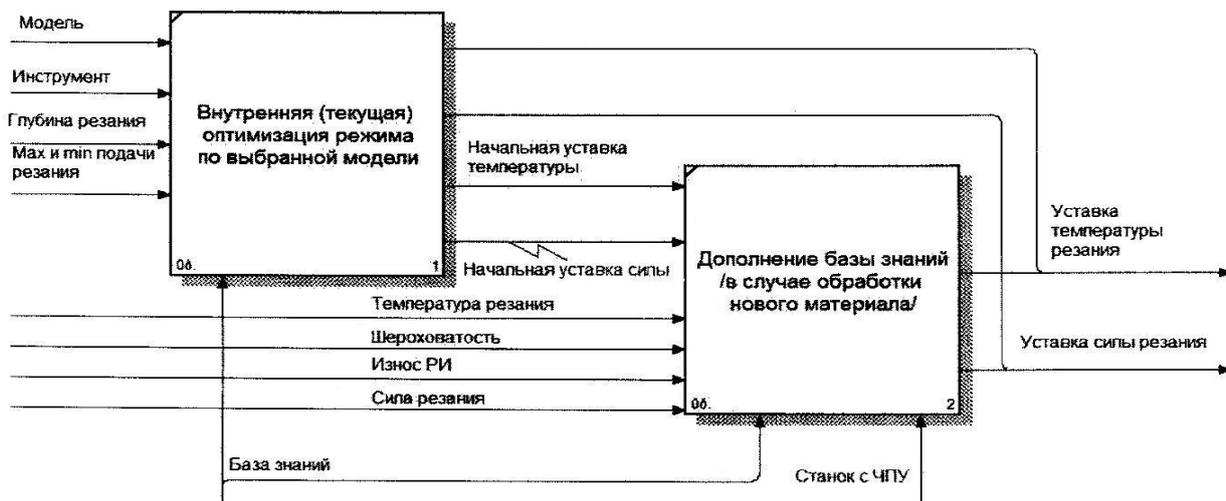


Рис. 3. Функциональная модель второго уровня

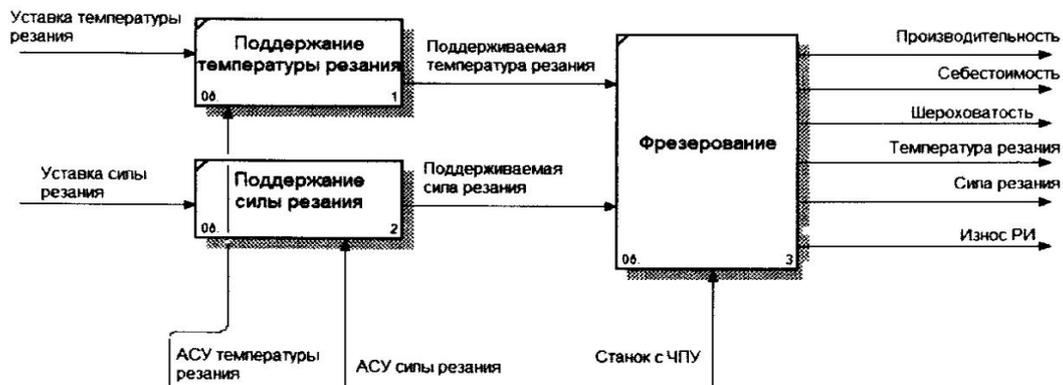


Рис. 4. Функциональная модель первого уровня по методологии IDEF0 СУ станочным модулем

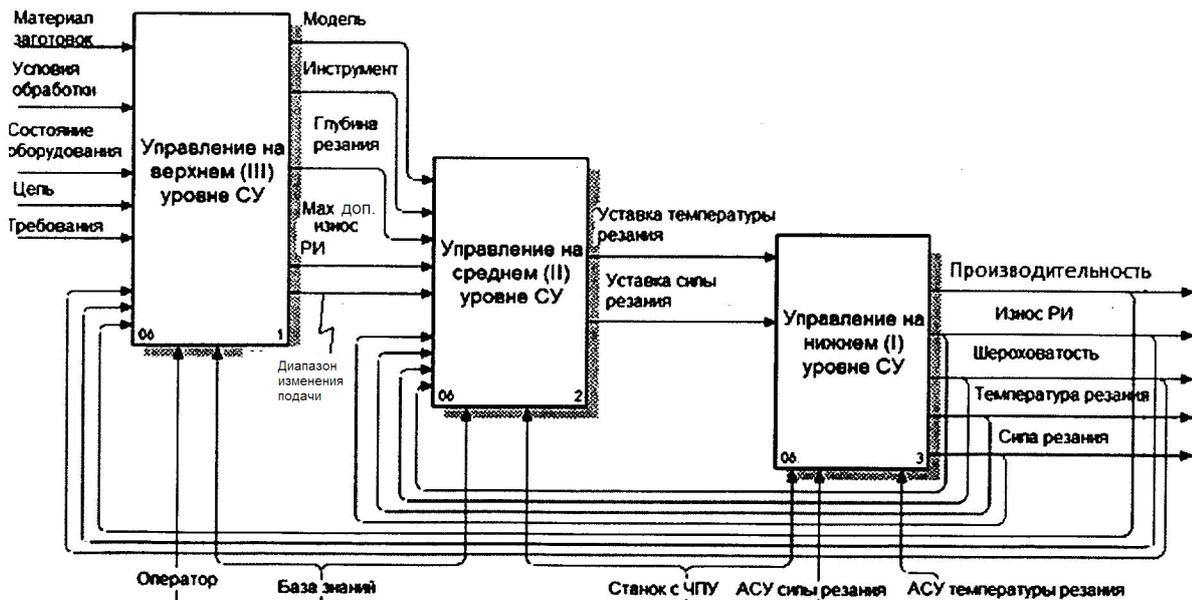


Рис. 5. Функциональная модель трехуровневой СУ станочным модулем

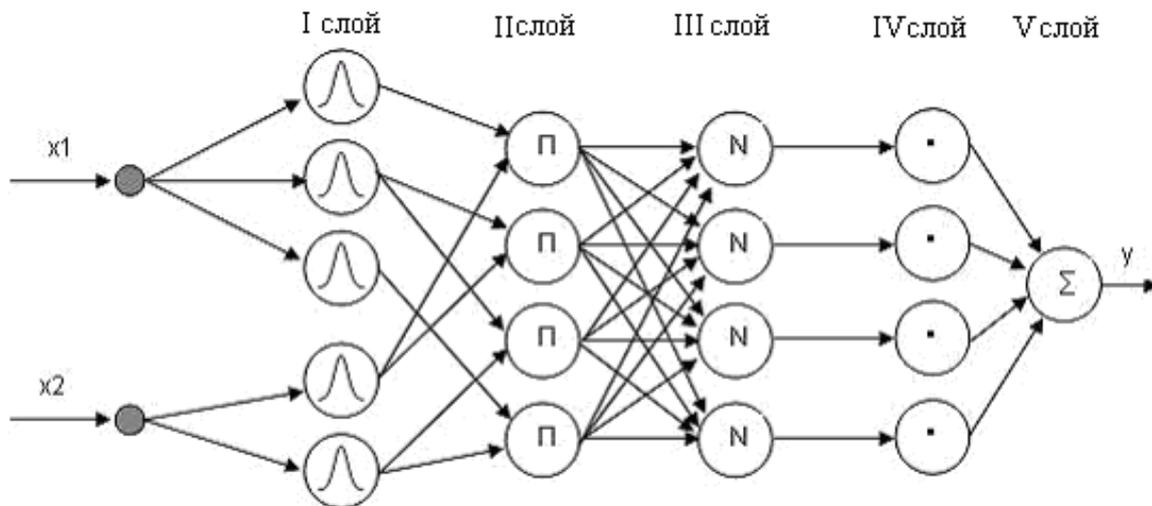


Рис. 6. Пример ANFIS сети

ANFIS реализует систему нечеткого вывода Сугено [8] в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения сигнала (рис. 6).

На рис. 6 изображена ANFIS-сеть с двумя входными переменными (x_1 и x_2) и четырьмя нечеткими правилами (П). Для лингвистической оценки входной переменной x_1 используется 3 терма, для переменной x_2 – 2 терма.

Различные слои этой нейронной сети выполняют следующие функции:

1. Первый слой – термы входных переменных. Обеспечивает вычисление значений функций принадлежности при конкретных значениях входов.

2. Второй слой – antecedentes (посылки) нечетких правил. Каждый узел данного слоя является фиксированным узлом, перемножающим входные сигналы.

3. Третий слой – нормализация степеней выполнения правил. Каждый i -й узел данного слоя определяет отношение веса i -го правила к сумме весов всех правил.

4. Четвертый слой – заключение правил.

5. Пятый слой – агрегирование результата, полученного по различным правилам. Единственный узел данного слоя является фиксированным узлом, в котором вычисляется полное

выходное значение адаптивной сети Y как сумма всех входных сигналов.

Количество слоёв и нейронов может изменяться в зависимости от сложности задачи, количества данных для обучения, требуемого количества входов и выходов сети и имеющимися ресурсами: памятью и быстродействием машины, на которой моделируется сеть. Оптимальное количество нейронов определяется в результате экспериментальных исследований.

Пусть в r -м эксперименте на вход системы подаётся задающее воздействие g^r . Обозначив через $\varepsilon^r(k) = y^r(k) - y_{ЭМ}^r(k)$ величину рассогласования между выходом объекта $y^r(k)$ и выходом эталонной модели $y_{ЭМ}^r(k)$ для r -го эксперимента, найдём суммарную квадратичную ошибку системы:

$$E^r = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [\varepsilon^r(k)]^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [y^r(k) - y_{ЭМ}^r(k)]^2.$$

Здесь целое число $K = (2...3)t_{\text{пер}}/T_0$ выбирается таким образом, чтобы за данное число тактов переходный процесс в САУ заведомо закончился. Цель обучения НС – подобрать такие веса синаптических связей НС, при которых E^r принимает достаточно малые значения $E^r \rightarrow \min$. Таким образом, в качестве элементов обучающей выборки здесь выступают пары задающее воздействие – желаемая реакция системы управления, то есть НС в данном случае – настраиваемый «чёрный ящик», изменением характеристик которого достигается уменьшением ошибки управления $\varepsilon^r(k)$.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ В САУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Управление процессом механической обработки в современных компьютерных системах управления осуществляется управляющей программой. В ней формируются значения задающих сигналов по управляющим параметрам (уставки, предельные значения управляющих параметров – скорости резания, подачи инструментов), допустимые значения выходных координат – износа инструмента, параметров качества обработанной поверхности – шероховатости, наклепа, остаточных напряжений, алгоритмы диагностирования состояния элементов системы, самообучения, идентификации моделей.

Формирование управляющей программы осуществляется на основе конструкторской документации о детали, получаемой из отдела главного конструктора (система UNIGRAFS, САD-системы), в результате технологической подготовки производства (необходимые документы – ГОСТы, инструкции, приказы поступают из отдела главного технолога – ОГТ).

Так, для условий УМПО (Уфимского моторного производственного объединения) по методологии IDEFO разработана функциональная модель изготовления детали «лопатка» турбины авиационного двигателя (рис. 7), по которой можно представить и схему формирования управляющей программы, и ее использование при изготовлении детали.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА В САУ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

В современных интеллектуальных СУ оптимизация (в том числе внешняя) ПР должна осуществляться с помощью экспертных систем [7]. Экспертная система содержит в себе базу данных (БД), базу знаний (БЗ), подсистему вывода данных и подсистему интерфейса.

База данных (в том числе библиотека моделей) содержит непрерывно обновляемые данные (предыдущие, текущие, прогнозные) о характеристиках объекта и внешней среде, информацию о граничных значениях соответствующих параметров.

База знаний содержит знания о специфике работы конкретного объекта, целях, стратегиях и алгоритмах управления, о результатах идентификации и прогноза его характеристик.

База знаний содержит знания о специфике работы конкретного объекта, целях, стратегиях и алгоритмах управления, о результатах идентификации и прогноза его характеристик.

Подсистема логического вывода осуществляет выбор рациональной (оптимальной) структуры и параметров управляющих устройств, регуляторов.

Подсистема интерфейса организует интерактивный режим пополнения базы знаний с участием эксперта (режим обучения) и обеспечивает общение с пользователем (оператором), включая механизм принятия решения по управлению.

При изменении условий обработки (смене станка, инструмента, СОТС и т. д.) здесь производится процесс обучения по сигналам с первого (нижнего) уровня.

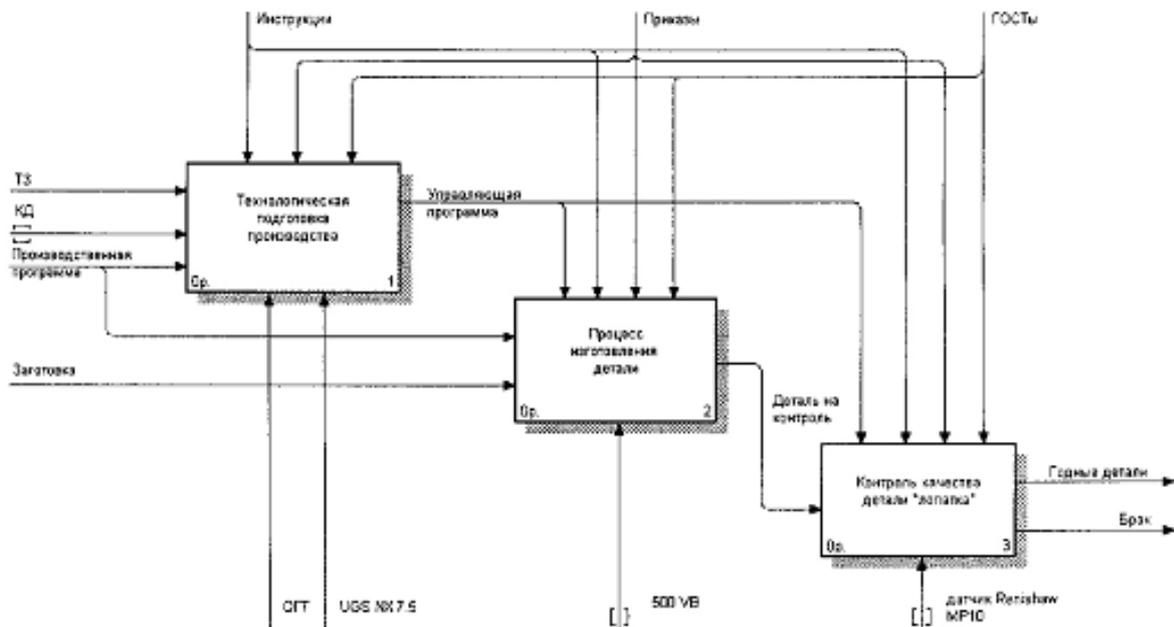


Рис. 7. Функциональная модель изготовления детали и создания управляющей программы

В памяти ЭВМ закладываются: данные о станке, инструменте, обрабатываемом материале, пакет программ по оптимизации структуры САУ и ведения ПР, библиотека (комплекс) моделей процесса резания как исходные для первого шага оптимизации.

В САУ процессом механообработки динамические экспертные системы эффективно формировать на основе положения об оптимальной температуре резания, обоснованного профессором А. Д. Макаровым [6].

Экспертные решения о принципах определения оптимальной температуры резания для новых обрабатываемых материалов и измененных условий резания (новые инструменты, оборудование, СОТС и т. д.) можно формализовать на основе моделей процесса резания вида $\theta = f(s_b, s, t, r, \varphi, \text{СОТС})$ [1, 4, 6] или путем определения температуры резания θ опытным путем по методикам, разработанным в УГАТУ [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение теории интеллектуального управления техническими объектами позволило обосновать методологию, принципы построения самообучающихся, самоорганизующих систем

управления процессом механообработки ответственных деталей машиностроительных изделий, например, авиадвигателей.

Проблемы описания функционирования сложных объектов управления, формализации процессов принятия решений при управлении и проектировании систем управления такими объектами требуют применения иерархических структур их описания и управления.

Так, оптимальное управление процессом резания при механообработке деталей авиадвигателей требует 3-уровневой структуры управления и двухэтапности процессов оптимизации.

На основе построения функциональных моделей по идеологии IDEF0 каждого уровня и всей системы управления обоснована методология оптимального управления технологическим процессом (например, процессами резания).

Для обеспечения алгоритмов самообучения, самодиагностики, самоорганизации в условиях изменений внешних и внутренних условий функционирования обоснована структура динамических экспертных систем и необходимость применения нечетких нейронных (гибридных) сетей при разработке алгоритмов управления процессами механообработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зориктуев В. Ц.** Автоматизация технологических процессов изготовления деталей авиадвигателей // Полет. 2002. № 2. С. 69–73.
2. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.
3. **Месарович М. Д., Мако Д., Такахага И.** Теория иерархических многоуровневых систем / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 344 с.
4. **Зориктуев В. Ц., Хузин И. С.** Электропроводимость контакта «инструмент-деталь» – физический и информационный параметр в станочных системах. М.: Машиностроение, 1998. 176 с.
5. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 450 с.
6. **Зориктуев В. Ц., Загидуллин Р. Р., Лютов А. Г., Никитин Ю. А., Схиртладзе А. Г.** Управление технологическими процессами в машиностроении / Под общ. ред. В. Ц. Зориктуева. Ст. Оскол – М.: ТНТ, 2010. 512 с.
7. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. / Т. 5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 784 с.
8. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

ОБ АВТОРАХ

ЗОРИКТУЕВ Вячеслав Цыденович, проф. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1963), д-р техн. наук (Мосстанкин, 1990). Засл. работник высш. шк. РФ (2012), засл. деят. науки РБ (1982), засл. проф. УГАТУ (2012). Иссл. в обл. автоматизации технологических процессов.

РУБЦОВ Дмитрий Юрьевич, магистрант. Б-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011) Иссл. в обл. автоматиз. и упр. технол. процессами.

ФАЙРУШИН Булат Наилович, асп. той же каф. Дипл. инж. по автоматизации технол. процессов и производств (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. автоматиз. технол. процессов.

METADATA

Title: Methodology for building intelligent systems process control machining of aircraft engine parts.

Authors: V. C. Zoriktuev, B. N. Fayrushin, and D. Y. Rubcov

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: katp07@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 79-86, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Grounded methodology of formation of hierarchical models management systems, based on these structures and algorithms optimal process control machining.

Key words: multi-level intelligent control system; external and internal optimization of machining processes; mechatronic machine tools; expert systems based on dynamic position of the optimal cutting.

References (English transliteration):

1. V. Ts. Zoriktuev, "Automation of technological processes for aircraft engine parts," *Polet*, no. 2, pp. 69-73, 2002.
2. I. M. Makarov, V. M. Lokhin, S. V. Manko, and M. P. Romanov, *Artificial intelligence and intelligent management systems*. Moscow: Nauka, 2006.
3. M. D. Mesarovich, D. Mako, and I. Takahara, *Theory of hierarchical multilevel systems*. New York: Academic Press, 1979.
4. V. Ts. Zoriktuev and I. S. Huzin, *Conductivity dependence of contact " tool - item " - the physical and information parameter in machine systems*. Moscow: Mashinostroenie, 1998.
5. I. P. Norenkov, *Fundamentals of computer-aided design*. Moscow: Publishing House of the Bauman MSTU, 2010.
6. V. Ts. Zoriktuev, R. R. Zagidullin, A. G. Liutov, Y. A. Nikitin, and A. G. Skhirtladze, *Management of technological processes in engineering*, V. Ts. Zoriktuev Ed. Stary Oskol – Moscow: TNT, 2010.
7. K. A. Pupkova and N. D. Yegupova, Eds, *Methods of classical and modern control theory: tutorial in 5 volumes*, Vol. 5: *Methods of modern theory of automatic upravljeniya*. Moscow: Publishing House of the Bauman MSTU, 2004.
8. V. I. Vasilyev and B. G. Il'yasov, *Intelligent Control Systems. Theory and practice*. Mjscow: Radiotekhnika, 2009.

About authors:

ZORIKTUEV, Vyacheslav Tsydenovich, Prof., Technological Processes Automation Dept., Dipl. Mechanical Engineer (UAI 1963) , Dr. Tech. Sci. (Mosstankin , 1990). Honored Worker of Higher School of Russia (2012), Honored Scientist RB (1982), Distinguished Professor USATU (2012). Research in the field of process automation.

RUBTSOV, Dmitry Yuryevich, undergrad., bachelor of engineering and technology (USATU, 2011) Research in the field of automation and process control.

FAYRUSHIN, Bulat Nailovich, Postgrad. Student of Technological Processes Automation Dept. Dipl. Engineer (USATU, 2012). Research in the field of process automation.