

УДК 681.513

В.В. Лимаренко

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Предложено решение задачи синтеза оптимального технологического процесса изготовления изделий методами механообработки металлов, основанное на операциях резания с использованием методов искусственного интеллекта – генетических алгоритмов, искусственных нейронных сетей и производственных правил. Для синтеза оптимального технологического процесса разработана специализированная система поддержки принятия решений.

Ключевые слова: синтез оптимального технологического процесса, искусственный интеллект, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети, производственные правила, система поддержки принятия решений.

Введение

Постановка проблемы. На современном этапе развития производства значительную роль приобрели вопросы улучшения эффективности технологических процессов (ТП) механообработки металлов без существенной замены существующего станочного парка и инструментов за счет оптимизации структуры ТП и операционных параметров. Данный метод оптимизации ТП является наименее затратным с экономической точки зрения и позволяет получить качественное изделие за наименьшее время [1-3].

Анализ литературы. Сейчас применяется целый ряд программных комплексов, призванных решать данные вопросы: Timeline, ADEM, TechnoLogiCS и т.п. Основными недостатком данных систем является их очень высокая стоимость, сложность для использования конечным пользователем, полное или частичное отсутствие поддержки на территории Украины и длительный срок интеграции. Так же необходимо отметить, что многие программы ограничиваются структурной оптимизацией ТП, не выполняя параметрическую оптимизацию, что приводит к необходимости дополнительных затрат времени и ресурсов на расчет параметров обработки изделий на операциях.

Попытки формализовать, структурировать и описать математически процесс механообработки изделий начали предприниматься в 40-х годах прошлого столетия. Сейчас известно несколько теорий резания. Среди них: теория Г. Эрнста и М. Мерчанта, теория Е. Ли и Б. Шаффера, теория Р. Хилла, Е. Ли и С. Таппера, теория Д. Кристоферсона, В. Палмера и П. Оксли и целого ряда других авторов [1, 4]. Более ранние теории опираются на большое количество экспериментальных данных и допущений, более современные теории пытаются отойти от допущений и экспериментов и уже в большей степени опираются на теоретические изыскания и более точ-

ный математический аппарат. Необходимо отметить, что большинство данных теорий учитывают только случаи применения острого, т.е. не имеющего износа и соответствующих ему дефектов, инструмента [1], что в значительной мере усложняет их применение для решения практической задачи управления процессами механообработки металлов. Теории резания, учитывающие износ инструмента, стали появляться относительно недавно, в 90-х годах прошлого века. Авторами этих теорий стали Е. J. A. Armarego, J. Wang и P. Mathew, Wenge Song и др. [5-7]. Данные теории позволяют на основе расчета сил, действующих на инструмент и заготовку, получить более точную математическую модель, описывающую процесс механообработки металлов. Благодаря данным исследованиям стало возможно создание программных продуктов, позволяющих не только синтезировать оптимальную структуру ТП механообработки, но и управлять непосредственно операциями механообработки путем определения оптимальных режимов с учетом реального состояния инструмента в любой момент времени.

Цель статьи – постановка задачи синтеза оптимального технологического процесса механообработки резанием металлов с учетом накопленного износа и обоснование методов решения, основанного на методах искусственного интеллекта – генетических алгоритмах, искусственных нейронных сетях и производственных правил.

Результаты исследований

Для решения задачи оптимального управления ТП механообработки необходимо решить две подзадачи: синтез оптимальной структуры ТП и расчет оптимальных режимов обработки на операциях. Обе эти задачи являются сложными в связи с наличием большого количества эмпирической информации, сложными взаимосвязями между параметрами процесса и отсутствием математического

аппарата полно и с достаточной точностью описывающего процесс механообработки без использования экспериментальных данных [1-4, 8, 9]. В области мировой теории резания была проведена значительная часть научно-исследовательской работы, которая представлена в виде инженерных справочников, электронных баз данных, методических рекомендаций и специализированных программных продуктов. Однако, даже наиболее широко используемые приложения не имеют полных базовых физических моделей. В большинстве случаев невозможно с достаточной полнотой смоделировать физический аспект процесса резания. Проблема состоит в чрезвычайной сложности процесса резания [1–9]. Процесс резания характеризуется большим количеством параметров и факторов, которые имеют сложную связь и взаимное влияние.

ТП механообработки можно рассматривать, как совокупность отдельных этапов, которые представляют собой различные операции обработки заготовки. Для синтеза оптимального ТП механообработки и последующего эффективного управления им, необходимо получить такие последовательности и режимы операций, при которых оборудование будет использоваться с наибольшей эффективностью, при наименьшем или полном отсутствии простоев и минимальной цене обработки [1 – 4]. При разработке ТП учитывают технические и технологические параметры оборудования и инструмента, стоимость их эксплуатации, затраты на заработную плату при эксплуатации данного оборудования, эффективность его использования для получения конечного продукта с заданными свойствами и характеристиками, методы обработки, ограничения на технологическую возможность переходов между оборудованием и операциями и т.д. [1–6, 8]. Структура ТП механообработки представлена на рис. 1.

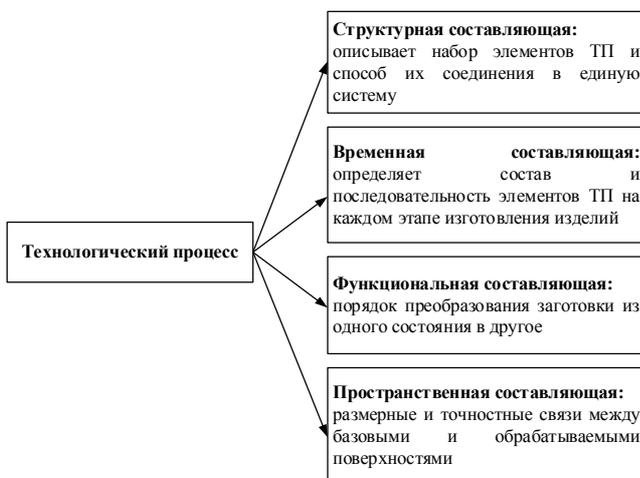


Рис. 1. Структура ТП механообработки

Задачи синтеза ТП решаются в два этапа: первый – синтез структуры ТП; второй – параметриче-

ская оптимизация. Синтез структуры технологического процесса направлен на создание оптимальной последовательности операций технологического процесса, а целью параметрической оптимизации является поиск оптимальных режимов выполнения операции, с учетом всех ограничивающих факторов [2, 3, 5–9]. В процессе синтеза ТП необходимо учитывать, что возможна такая ситуация, когда выбранная, как наилучшая структура ТП не может быть реализована на уровне операций, либо эти операции не будут являться оптимальными. Тогда необходимо вернуться к этапу синтеза структуры и выбрать другую структуру ТП [2, 3].

На текущем этапе развития систем автоматизированного управления и проектирования ТП сложилась ситуация, когда решается только одна из этих задач, либо обе задачи, но в разных системах, т.е. в отрыве одна от другой. Это приводит к тому, что в комплексе полученное решение может быть далеко от оптимального. Такая постановка связана с тем, что большинство проводимых сейчас исследований посвящены оптимизации отдельных элементов ТП, а не системы в целом, и задача одновременного подбора оптимальной структуры ТП и параметров работы отдельных элементов данной структуры является слабо формализованной и обладает высокой многовариантностью решений, как большим количеством вариантов комбинаций элементов, входящих в структуру, так и параметров работы этих элементов. Пренебрежение оптимизацией структуры ТП может привести к значительному ухудшению ТП, его удорожанию и снижению продуктивности производства. В свою очередь пренебрежение параметрической оптимизацией операций может привести к тому, что даже идеальная, на первый взгляд, структура ТП может оказаться не функциональной [2, 3, 5–9].

При оптимизации ТП важным является вопрос выбора критериев оптимизации. В зависимости от выбранного критерия оптимизации может изменяться и сама структура ТП. К наиболее часто применяемым критериям оптимизации ТП относятся экономические критерии и технико-экономические критерии.

В работе целевой функцией оптимизации при синтезе структуры технологического процесса выбрана общая себестоимость всех затрат ТП A_{TP} на выпуск одного изделия

$$A_{TP} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{P_i} A_{ij} \Rightarrow \min ,$$

где A_{ij} – себестоимость операций на j -й стадии обработки i -й поверхности заготовки, I – число поверхностей, которые нужно обработать; P_i – число стадий обработки i -й поверхности, $i = \overline{1...I}$, $j = \overline{1...P_i}$.

Задачи разработки оптимальной структуры ТП решаются с использованием трех основных методов:

метод аналогій, метод аналізу і метод синтезу. Недостатками методу аналогій являються: необхідність наявності БЗ і аналогічних технологічних процесів; ТП, отриманий методом аналогій, може бути не оптимальним внаслідок не повної ідентичності деталі-аналога і нової деталі; технологічний процес-аналог може бути оптимізований з урахуванням цілей оптимізації не актуальних для нового технологічного процесу або не враховувати частини необхідних цілей. Недостатками методу аналізу являються: необхідність наявності уніфікованого ТП; неможливість отримання оптимального технічного процесу за рахунок усереднення уніфікованих типових рішень; уніфіковані типові рішення можуть або не враховувати, або не повністю враховувати необхідні цілі оптимізації ТП. Цим недостатком позбавлений метод синтезу. Метод синтезу базується на послідовному ієрархічному синтезі технічного процесу, що складається з синтезу послідовного набору технологічних операцій і їх положення в часі. Для цього деталь ділиться на елементарні поверхності, визначаються проміжні стани для їх отримання і вибираються способи їх обробки. При цьому враховуються розмірні зв'язки елементів деталі і виконується синтез схем базирования і структур операцій.

Т.к. задача синтезу оптимальної структури ТП різання металів є багатокритеріальною слабо формалізованою задачею для її рішення в даній роботі застосовані методи штучного інтелекту, а саме методи логічного програмування з використанням виробничих правил, при цьому рішення цієї задачі на сьогодні не представляється можливим [9–10]. Для рішення даної задачі буде застосовано метод декомпозиції, т.е. розбиття складної задачі на складові компоненти і рішення її поетапно, виходячи з рішень, отриманих на попередніх етапах. При отриманні на всіх етапах оптимальних рішень, не суперечливих один одному, задачу можна вважати рішенням,

а отримане рішення оптимальним або достатньо близьким до такого.

Структурна схема поетапної оптимізації ТП виготовлення виробів з допомогою механообробки металів складається з 6 етапів:

- 1 – вибір варіанта отримання заготовки;
- 2 – вибір необхідних технологічних переходів;
- 3 – вибір необхідного обладнання;
- 4 – вибір необхідних інструментів;
- 5 – вибір необхідних пристосувань і методів установки заготовки;
- 6 – вибір мастильно-охолоджуючої технологічної середовища.

Для кожного з етапів будуть створені виробничі правила, базуючись на наявних знаннях і накопленому практичному досвіді. На рис. 2 показана структурна схема розроблюваної системи підтримки прийняття рішень (СППР).

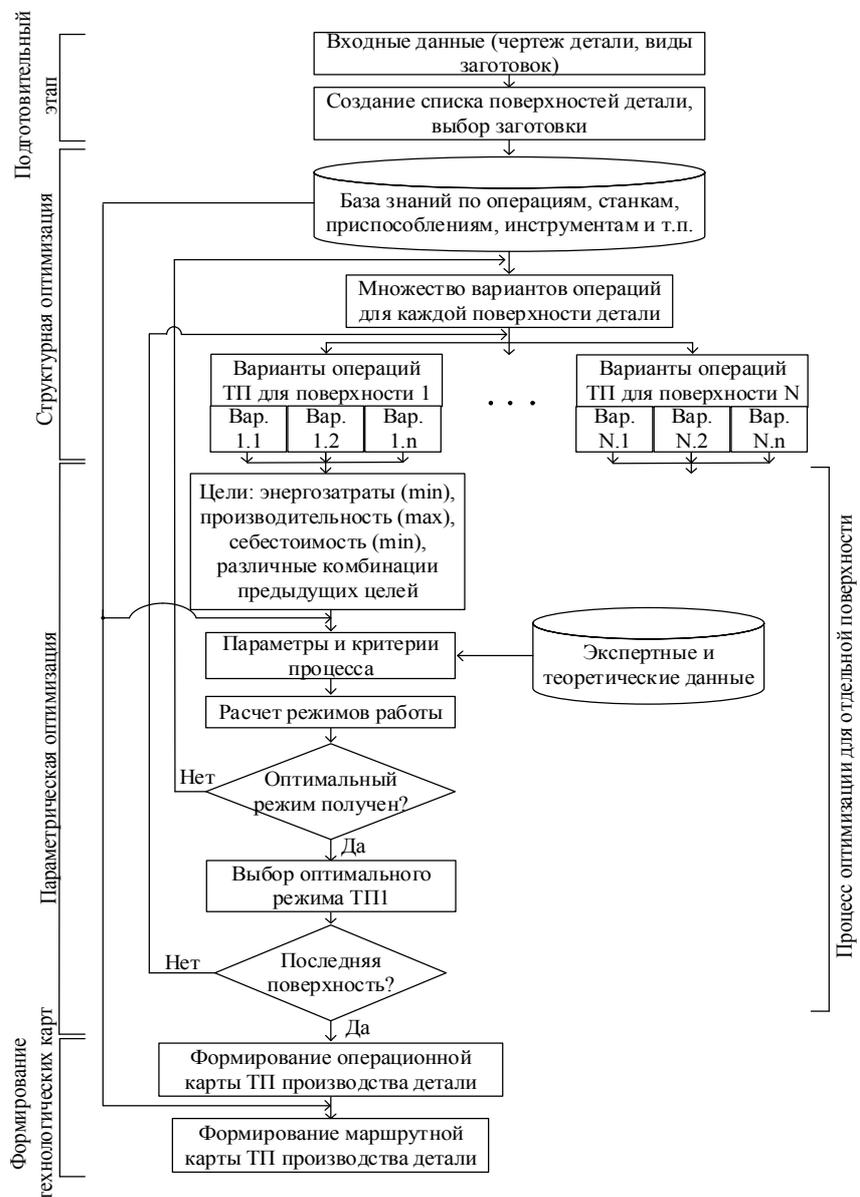


Рис. 2. Структурная схема СППР

Работу системы можно разбить на 4 этапа.

Первый – подготовительный этап. Его задача – выбор заготовки и создание списка поверхностей детали. На основе чертежа детали, создается список поверхностей деталей, их размеры, материалы из которых будет создана деталь (марка стали) и определяется базовая поверхность для начала обработки детали;

Второй – структурная оптимизация. Задача данного этапа – на основе данных, полученных на предыдущем этапе, и данных из базы знаний СППР (см. рис.2) создать множество возможных вариантов операций для обработки каждой поверхности, с целью выбора наиболее оптимального варианта для каждой из них. В дальнейшем из этих вариантов и будет синтезирован общий ТП механообработки. Работа данного блока базируется на использовании возможностей языка Visual Prolog.

Третий – параметрическая оптимизация. Задача данного этапа – определить оптимальные параметры выполнения каждой операции ТП при конкретных технических условиях.

На этом этапе будут использованы в качестве критериев оптимальности четыре цели оптимизации: минимизация себестоимости операции, максимизация качества, минимизация энергозатрат и максимизация производительности и 10 ограничений: по мощности электродвигателя привода главного движения станка; по минимальной и максимальной скорости резания; по минимальной и максимальной подаче; по жесткости режущего инструмента; по жесткости заготовки; по требуемой шероховатости поверхности. Если же оптимальное решение, которое найдено в результате работы этапа, невозможно практически осуществить на имеющемся оборудовании, то СППР вернется к генерации нового множества возможных вариантов ТП.

Особенностью постановки задачи является то, что при решении оптимизационной задачи, на примере токарной обработки, учитывается накапливаемый износ задней поверхности инструмента. Такой подход позволяет создать математическую модель ТП резания, практически не имеющую погрешности вычислений, и максимально приближенную к реальной физической модели процесса резания. Еще одной особенностью является поиск решения, как для каждого критерия оптимальности в отдельности, так и для комбинации всех 4-х критериев, т.е. задача будет решена в многокритериальной постановке. Существующие методы решения многокритериальной оптимизационной задачи (МОЗ) показаны на рис. 3 [2, 3, 10–11].

Традиционными инженерными методами решения МОЗ являются методы, которые строятся на принципах сведения МОЗ к некоторой однокритериальной задаче [2, 3, 10–11]. Для этого применяются различные методы: метод последовательных уступок, метод главного критерия, метод линейной свертки, метод относительного минимакса и т.п. При использовании данных методов идут на определенные уступки и приближения, которые искажа-

ют полученный результат, внося в него определенные ошибки и погрешности [2, 3, 10–11].

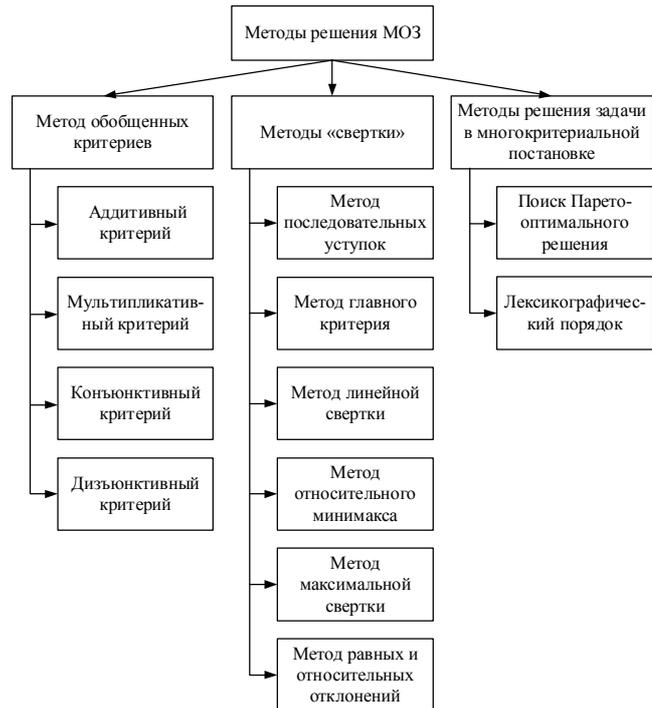


Рис. 3. Существующие методы решения МОЗ

Все методы решения МОЗ, связанные с «сверткой» задачи, т.е. переходом от МОЗ к однокритериальной задаче имеют схожие недостатки – сложность выбора «главного критерия», сложность назначения весовых коэффициентов различных критериев, наличие допущений или уступок, сложность при сравнении критериев, имеющих разные размерности, сужение области поиска, но существуют методы, которые позволяют минимизировать возможные ошибки, характерные для метода свертки МОЗ. Таким методом является метод нахождения лексикографического решения и метод построения Парето-оптимального решения. Недостатком лексикографического метода является то, что он применим только для задач, в которых цели можно расположить иерархически [10–13]. Недостатком метода построения Парето-оптимального решения в большом объеме вычислений, которые необходимо провести, в зависимости полученного результата от полноты использованных в расчетах критериев и параметров, а также в том, что невозможно найти единственное решение МОЗ, можно получить лишь множество эффективных решений. При этом необходимо отметить, что полученные решения будут более точными и полными, чем решения, полученные при использовании других методов [10–13].

При проектировании и оптимизации ТП в качестве элементов искусственного интеллекта используются искусственные нейронные сети (ИНС) и генетические алгоритмы (ГА) [13, 14]. ГА чаще всего используются для комплексного решения МОЗ, тогда как ИНС – для получения искомых параметров, особенно в тех случаях, когда физические законы, опре-

деляющие данные параметры, пока не известны [14]. ИНС обладают способностью реализовать широкий класс функций без априорных допущений о законах их распределения. Повышенный интерес к применению ИНС в подобного рода задачах объясняется простотой и эффективностью, с которой нейронные сети выполняют функциональные преобразования. На основе их обучения может быть обеспечено более точное и оперативное получение искомым параметров в реальном масштабе времени [14]. ГА, использующие эволюционный подход к решению МОЗ, позволяют избавиться от основных недостатков классических, «сверточных» методов оптимизации. Они подходят для задач с большим количеством, как входных параметров, так и целей оптимизации. ГА позволяют получить множество Парето-оптимальных решений даже в случаях однократного запуска алгоритма, т.е. ГА находят несколько Парето-оптимальных решений параллельно, что положительно отличает их от классических математических методов, в которых для нахождения каждой точки необходимо произвести отдельные вычисления [14]. Использование ГА для решения задач нахождения Парето-оптимального множества более предпочтительно, чем использование классических математических методов.

ГА, в которых непосредственно используют концепцию доминирования по Парето, наиболее подходят для решения задач оптимизации ТП. К ним относятся: VEGA – Vector Evaluated Genetic Algorithm; FFGA – Fonseca and Fleming’s Multiobjective Genetic Algorithm; NPGA – Niche Pareto Genetic Algorithm; SPEA – Strength Pareto Evolutionary Algorithm [15]. В целом же алгоритмы VEGA и FFGA обладают лучшей сходимостью, но не имеют механизмов обеспечения равномерности покрытия множества Парето, а алгоритмы NPGA и SPEA обеспечивают хорошее покрытие, но требуют больших вычислительных затрат. Так же механизм поддержания разнообразия решений, используемый в алгоритмах NPGA и SPEA, приводит к появлению решений, выходящих за пределы области Парето [86–90].

Задача параметрической оптимизации ТП механообработки может быть решена, как в статической постановке, так и в динамической. При статической постановке задачи считается, что все факторы и характеристики, входящие в процесс механообработки, являются постоянными и не изменяются с течением времени. Недостатком данного подхода является то, что с течением времени, вследствие естественного изменения параметров процесса (износ инструмента, и, как следствие, изменение сил, действующих в зоне резания), полученные в ходе оптимизации значения параметров ТП все больше удаляются от оптимальных, т.е. возникает накапливаемая ошибка, размер которой с течением времени все возрастает. Достоинством же данного метода является его простота в сравнении с динамическим методом оптимизации.

Динамический метод оптимизации основан на моделях, которые учитывают изменения параметров процесса с течением времени. Результатом применения данного метода является не одно решение, а множество решений, которые отличаются одно от другого и зависят от изменения параметров с течением времени. Данный метод лишен недостатков статического метода, но он требует больших затрат ресурсов для проведения вычислений.

В работе задача параметрической оптимизации ТП механообработки будет решена в динамической постановке с учетом накапливаемого износа инструмента. Данный подход позволяет получить наиболее точную математическую модель процесса и, как следствие, наиболее точные результаты.

Одной из проблем, возникающих при данной постановке задачи, является то, что не для всех параметров, входящих в математическую модель, известен аналитический вид функций, позволяющий рассчитать параметры с заданной точностью. К таким параметрам относятся: стойкость инструмента, уровень износа по задней поверхности и фактическая шероховатость поверхности. Для нахождения значений данных параметров будет использована обученная на базе ограниченного количества экспериментальных данных нейронная сеть перцептрон.

Четвертый – формирование технологических карт. Это завершающий этап работы СППР. Задача данного этапа – формирование маршрутной карты ТП и расчет оптимальных параметров операций ТП для гибкого производственного модуля (ГПМ). Для функционирования системы будет разработана и создана база знаний, которая будет включать в себя данные по станкам, операциям, приспособлениям, инструментам и т.п. данные, необходимые как для проведения расчетов, так и для операций синтеза. Структура базы знаний показана на рис. 4.

Выводы

Для синтеза оптимальной структуры технологического процесса обработки металлов предложена СППР, основанная на методах искусственного интеллекта: генетических алгоритмах, искусственных нейронных сетях и логическом программировании с использованием продукционных правил. С помощью данной системы будет выполняться автоматический синтез оптимальной структуры ТП с учетом выбранных целей оптимизации.

Решение задачи имеет значительную вычислительную сложность, т.к. практически на каждом этапе работы системы необходимо выполнить значительное количество расчетов для поиска как оптимальной структуры, так и оптимальных режимов функционирования выбранной структуры. Разрабатываемая система призвана автоматизировать решение данной задачи, сократив тем самым время, необходимое на синтез оптимального ТП и уменьшив стоимость инженерной разработки ТП.

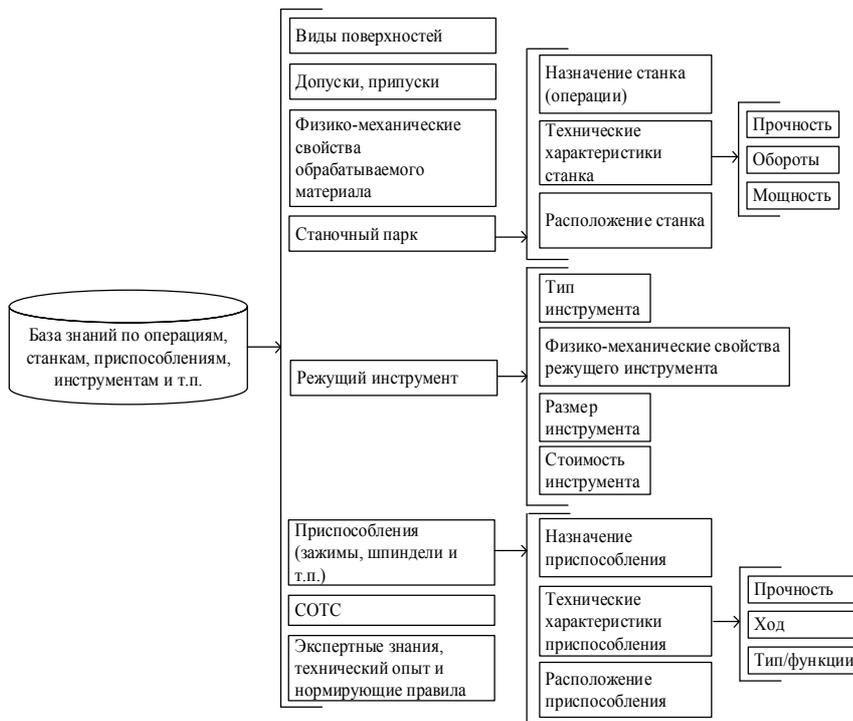


Рис. 4. Структура базы знаний

Список литературы

1. Воронцов А.Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / А.Л. Воронцов, А.Ю. Албагачиев, Н.М. Султан-заде; Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 552 с.
2. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. Рыжов Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – К. : Наукова думка, 1989. – 192 с.
4. Яцерицын П.И. Теория резания / Яцерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. ; Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Wenge Song. Development of predictive force models for classical orthogonal and oblique cutting and turning operations incorporating tool flank wear effects: PhD / Wenge Song. – Queensland University of Technology, 2006. – 208 p.
6. E. J. A. Armarego. Material Removal Processes – An Intermediate Course. / E. J. A. Armarego. – Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of Melbourne, 1994. – 250 p.

7. J. Wang. Development of a general tool model for turning operations based on a variable flow stress theory / J. Wang, P. Mathew // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 1995. – №35. – pp. 71-90.
8. Богуслаев А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Моногр. / Под ред. А.В. Богуслаева. – Запорожье : ОАО Мотор Сич, 2009. – 468 с.
9. Multi-objective optimization of cutting parameters for turning AISI 52100 steel : 7ème Assises MUGV2012, ENISE – CETIM / Serra R., Chibane H. – Saint-Etienne, 2012. – pp. 52-67.
10. Choudhuri K. Multi-objective optimization in turning – using a Genetic Algorithm / Choudhuri K., Pratihari D. K., Pal D. K. // Journal of Institute of Engineers. – 2002. – Vol. 82. – pp. 37-44.
11. Пестрецов С. И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания. Учебное пос. / С. И. Пестрецов – Тамбов : изд. ТамбГТУ. – 2009. – 104 с.
12. Феофанов А. Н. О методах многокритериальной оптимизации в связи с их применением к задаче построения гибких автоматических линий / А.Н. Феофанов, И.В. Иевлев // Стружка. – 2006. – № 14. – С. 20–23.
13. Дмитриенко В. Д. Методи та алгоритми прийняття рішень. Навчальний посібник. / В.Д. Дмитриенко, В.О. Кравец, С.Ю. Леонов. – Х. : НТУ "ХПИ", 2008. – 142 с.
14. Моделирование технологических процессов лезвийной обработки методами искусственного интеллекта (монография) / [Хавина И.П., Дмитриенко В.Д., Везуб Н.В., Хавин В.Л.]. – Х. : НТУ "ХПИ", – 2009. – 224 с.
15. Гуменникова А. В. Адаптивные поисковые алгоритмы для решения сложных задач многокритериальной оптимизации: дис. к.т.н. : 05.13.01 / Гуменникова Александра Викторовна. – Красноярск, 2006. – 140 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітряних Сил ім. Кожедуба, Харків.

ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МЕХАНООБРОБКУ МЕТАЛІВ

В.В. Лимаренко

Запропоновано рішення задачі синтезу оптимального технологічного процесу виготовлення виробів методами механічної обробки металів, засноване на операціях різання з використанням методів штучного інтелекту - генетичних алгоритмів, штучних нейронних мереж і продукційних правил. Для синтезу оптимального технологічного процесу розроблена спеціалізована система підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: синтез оптимального технологічного процесу, штучний інтелект, генетичні алгоритми, штучні нейронні мережі, продукційні правила, система підтримки прийняття рішень.

PROBLEMS OPTIMIZATION PROCESS MACHINING OF METALS

V.V. Limarenko

To solve the problem of synthesis of optimal structure of the technological process of processing of metals by cutting the model of decision support system based on artificial intelligence techniques - genetic algorithms, artificial neural networks and production rules.

Keywords: synthesis of the optimal process, artificial intelligence, genetic algorithms, artificial neural networks, production rules, decision-making support system.