ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.011

МЕХАНИЗМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2021

В статье приведены результаты исследования, посвященного описанию способа представления знаний в автоматизированных системах проектирования и управления технологическими процессами для единичного и мелкосерийного производств. Знания предлагается представлять в виде трех типов функций, характерных для человеческого мышления. Показано формирование новых знаний на основе предыдущего опыта.

Ключевые слова: технологический процесс, автоматизированное проектирование, искусственный интеллект, описание знаний.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-66-75

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительные системы автоматизированного проектирования (САПР, или CAD), относящиеся к областям проектирования и конструирования изделий и разработки технологических процессов (автоматизированная система технологической подготовки (АСТПП, или CAM)), в настоящее время находят все более широкое применение. Это обуславливается необходимостью проведения конструкторской и технологической подготовки в кратчайшие сроки с целью своевременного удовлетворения заявок потребителей наукоемкой продукции и вывода последней на рынок.

Известно, что одним из важнейших требований, обеспечивающим эффективность функционирования САПР и АСТПП, является наличие элементов искусственного интеллекта (ИИ) в процедурах синтеза решений. Наиболее важная черта интеллектуальных систем, относящихся к указанным выше областям, – использование механизма обучения. Такой подход позволяет продлить жизненный цикл автоматизированной системы без ущерба для качества синтезируемых решений, сделать САПР и АСТПП в какой-то мере инвариантными к объектам проектирования, сократить период верификации и валидации. Наличие элементов ИИ во многом определяется способами преобразования информации, заложенными в алгоритмах функционирования систем, т.е., в сущности говоря, формой представления знаний. Эти факты и определили цель настоящей работы.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В наиболее общем виде информационную суть любых моделей знаний в САПР (логических, продукционных, сетевых, табличных, аналитических зависимостей, интуиции проектировщика (пользователя системы) [1–4]) можно представить как информационное преобразование проектируемого объекта (ПО) (изделия, технологического процесса) из одного информационного состояния в другое с помощью операторов, определенных как проектные функции *R*. Проектные функции обеспечивают преобразование ПО из одного информационного состояния (C_i) в другое (C_j) [3]. Следовательно,

$$R = C_i \rightarrow C_j . \quad (1)$$

Каждое информационное состояние ПО трактуется широко (с точки зрения системного подхода). В системном аспекте ПО в качестве составляющих включает такие понятия, как «структура», «отношение», «состояние», «связь», «элемент», «функция» и т.д. Как техническая система информационное состояние ПО определяется [5, 6] пятью характеристиками:

$$\text{ПО} = < H, F, S, Z, U >, \quad (2)$$

где H – связи ПО с внешней средой; F – набор выполняемых ПО функций; S – структура ПО; Z – совокупность функциональных и структурных свойств ПО, определяемая составом его элементов; U – история развития ПО, включающая изменение его информационных преобразований.

Если исходить из принципа наследования системных свойств, то проектирующие системы (САПР, АСТПП) должны наследовать и историю ПО с той разницей, что их история – история изменения (развития) проектной функции – оператора *R*. А это не что иное, как обучение (или накопление и обобщение опыта).

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Процессы проектирования в САПР и АСТПП (как решающих системах) имеют специфический характер, который определяется сложностью и развитием объектов проектирования, взаимным влиянием ПО и изменяющейся областью их применения.

Процесс проектирования в АСТПП должен заключаться в преобразовании по определенным правилам исходной информации, имеющейся в задании на проектирование (конструкторской информации, базовой и нормативной информации), в информацию, определяющую содержание технологического процесса.

Процесс проектирования в САПР заключается в переработке по определенным алгоритмам исходной информации (технического задания на проектирование изделия) в информацию, определяющую геометрические и информационные модели изделия [3].

Таким образом, разработка САПР и АСТПП, связанная с моделированием процессов проектирования в указанных системах, сопряжена с задачами:

1) установления механизмов принятия решений на различных уровнях процесса проектирования (механизм А);

2) поддержания соответствия принимаемых решений реальным условиям эксплуатации (использования) проектируемых объектов в течение длительного периода времени путем видоизменения правил принятия решений на основе накопленного знания (механизм Б).

Процесс проектирования в указанных системах характеризуется пятью основными функционально-смысловыми типами преобразования информации:

1. Собственно проектные процессы, когда производится многоуровневый синтез оригинальных технологических процессов или моделей изделия.

2. Информационно-поисковые процессы, в ходе которых выбираются решения на основе типовых рекомендаций.

3. Обслуживающие процессы (ввод и детализация входной информации, обмен информацией, оформление и печать выходной информации, процедуры диалога с оператором-проектировщиком).

4. Процессы обучения пользователя системы, заключающиеся в корректировке его знаний о содержании процессов первых трех типов.

5. Процессы обучения и самообучения решающей системы, т.е. перестройка и видоизменение проектных процедур, знаний о ПС, охватывающие первые три типа преобразования [3].

Суть процессов 1, 2 и 3-го типов, характеризующую проектирование на низших уровнях декомпозиции, без учета их динамики можно представить как

$$q = f(S), \tag{3}$$

где q – результат решения (целевое состояние); S – задание на проектирование (начальное состояние).

ПРОЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ

Практическую значимость имеет представление процесса проектирования как совокупности взаимосвязанных информационных структур преобразования информации посредством проектной функции R. При этом должно обеспечиваться сохранение семантического содержания информационных структур решаемой задачи на всех уровнях декомпозиции и проектируемого объекта. Статическая часть R (формализованные правила проектирования) может описываться предикатными и аналитическими зависимостями, табличными и прочими моделями, графами.

Модификацию проектной функции R определяют составляющие:

1. Методы оптимизации решений, позволяющие на различных уровнях декомпозиции выбрать решение, близкое к оптимальному. При изменении области возможных решений, целевой функции оптимум, естественно, будет смещен.

2. Интуитивные знания, имеющиеся у проектировщиков и экспертов и реализуемые при взаимодействии с автоматизированной системой. Это, как правило, часть знания, трудно формализуемая или неформализованная к настоящему времени с требуемой детализацией и точностью. Она проявляется в избирательности решения и экспертной оценке вариантов [3].

3. Модели накопления знаний и корректировки процесса проектирования, имеющиеся в АСТПП и САПР.

Наличие данных элементов способствует обучению автоматизированных систем. Это позволит говорить о том, что им будут свойственны элементы ИИ, т.е. будет реализован механизм Б.

Таким образом, проектная функция R будет состоять из двух наборов элементов: множества правил преобразования информации R_F (механизм А) и множества функций накопления и корректировки знаний R_M (механизм Б):

$$R = \{R_F,\ R_M\}. \tag{4}$$

К настоящему времени в теории моделирования процессов проектирования отсутствует конкретное представление взаимодействия элементов функции вида R_F.

Тем не менее, анализируя методы переработки информации в САПР и АСТПП, следует заключить, что процесс синтеза решения должен включать аналитические и оптимизационные, логические и интуитивные составляющие. Тогда функция преобразования R_F представляется состоящей из подфункций трех видов:

$$R_F = \{LF, OF, IF\}, \tag{5}$$

где *LF*, *OF*, *IF* – множества логических, оптимизационных и интуитивных функций, представляющих собой объединение частных функций:

$$\mathrm{LF} = \overset{n}{\cup}\,\mathrm{LF_i};\ \mathrm{OF} = \overset{l}{\cup\!\!\rightleftarrows}\,\mathrm{OF_i};\ \mathrm{IF} = \overset{m}{\cup}\,\mathrm{IF_i}, \tag{6}$$

где *n*, *l*, *m* – число частных функций.

Логические функции *LF*, включающие качественные и количественные решения, характеризуются статистико-вероятностными связями частных значений результатов и аргументов решения, причем связь в настоящий момент времени однозначно и полностью определена. Логические функции формируются на основе опыта проектирования технических объектов. С помощью *LF* могут быть формализованы типовые решения по технологии, структурированы временные затраты на выполнение операций, данные по оборудованию и инструменту вместе с алгоритмами выбора, типовые решения по конструктивным элементам различных изделий и т.п. Функции могут представляться в автоматизированных системах в виде табличных, сетевых и перестановочных моделей [3].

Таким образом, сущность *x*-й *LF* записывается как

$$\begin{cases} q_i = \rho_i(\overset{l}{\cup}\, a_{kj});\overset{n}{\cup}\, \rho_i = fx \equiv LF_x;\overset{m}{\cup}\, q_i = g_x \equiv G_x; \\ \overset{l}{\cup}\, a_{kj} = A_K;\overset{p}{\cup}\, A_K = S_x, \end{cases} \tag{7}$$

где $fx \equiv LF_x$ – дискретное множество информационных преобразований (логическая функция) конкретной области применения; p_i – частный оператор LF_x (решающее правило); G_x – область существования результатов решения LF_x; q_i – частный результат решения для решающего правила p_i; a_{kj} – частное значение *k*-го аргумента; $A_к$ – область существования значений *k*-го аргумента; S_x – совокупность аргументов, влияющих на решения в области G_x.

Дискретность *LF* определяется дискретностью аргументов и значений результатов решения, а определенность – однозначностью множеств триад q_i, p_i, $\cup\, a_{kj}$. Однако *LF* являются ограниченными вследствие ограниченности G_x и S_x. Их примерами могут служить процедуры задания планов обработки поверхностей и выбора элементов времен в АСТПП. Логические функции, на первый взгляд, имеют некое подобие аксиом, однако важнейшее отличие заключается в том, что они более подвижны, изменяемы и могут модифицироваться в течение жизненного цикла решающей системы. В каждый конкретный момент времени они могут использоваться и как аксиомы [3].

Оптимизационные функции *OF* учитывают выявленные количественные зависимости результатов решения от значений определенных аргументов с обеспечением экстремума характеристик g_i:

$$\begin{cases} g_i = \phi_{yi}(\bigcup^{n} a_{kj}, \bigcup^{m} C_{kj}); \bigcup^{l} \phi_{ki} = OF_y \equiv f_y; \bigcup^{m} C_{kj} = C_k; \\ \left\{ \begin{array}{c} \bigcup g_i \\ g_{\min} \le g_i \le g_{\max} \end{array} \right\} = G_y; ((\bigcup^{q} A_{ki}) \cup (\bigcup^{p} C_{ki})) = S_y, \end{cases} \quad (8)$$

где $OF_y \equiv f_y$ – определенная *OF* конкретной области применения; φ_{yi} – аналитический оператор; G_y – область существования результатов решения функции OF_y; g_i – частное значение результата решения; S_y – аргументы, влияющие на выбор решения в пределах G_y; $\bigcup^{q} A_{ki} = A_k$ – неуправляемые аргументы, не зависящие от OF_y; A_k – область существования *k*-го аргумента; a_{kj} – частное значение *k*-го аргумента; $\bigcup^{p} C_{ki}$ – аргументы, оптимизирующие значения результатов решения (управляемые аргументы); C_k – область существования *k*-го управляемого аргумента; C_{ki} – частное значение *k*-го управляемого аргумента;

$$C_\kappa = \bigcup^{p} C_{ki} = \varphi_{k1}\left(\bigcup^{q}, A_{ki}, E\right); E = \varphi_{k2}(g_i), \quad (9)$$

где *E* – ожидаемая эффективность результатов решения.

Оптимизационная функция непрерывна вследствие непрерывности аргументов, однако результаты решения могут быть как непрерывными, так и дискретными. Для *OF* также характерны определенность и ограниченность.

Примерами подобных функций с дискретным значением области существования *G* могут служить зависимость, определяющая оптимальную последовательность обработки поверхностей в операции (АСТПП), передаточные отношения между звеньями узлов изделия (САПР). Примером *OF* с непрерывным значением результатов может быть случай определения оптимальных режимов резания в АСТПП по заданной целевой функции.

Интуитивные функции *IF*, отражающие субъективные знания разработчиков решающих систем или знания оператора-пользователя системы (в режиме диалога), включают неформализованные (неявные) интуитивные решения или триады:

$$g_i = \varphi_{zi}\left(\bigcup^{l} a_{kj}, \bigcup^{\infty} x_j\right); \ \bigcup^{\infty} \varphi_{zi} = IF_z \equiv f_z;$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \bigcup^{l} a_{kj} \\ a_{\min} \le a_{kj} \le a_{\max} \end{array} \right\} = A_k; \bigcup^{m} A_k = S_{z\text{я}};$$

(10)

$$\left\{ \begin{array}{c} \bigcup^{\infty} x_{kj} \\ x_{\min} \le x_{kj} \le x_{\max} \end{array} \right\} = X_k; \bigcup^{p} X_{kj} = S_{ZH}; S_Z = S_{Z\text{Я}} \cup S_{ZH}; \bigcup^{m} g_i = G_Z,$$

где g_i – частный результат решения, принадлежащий области G_z; G_z – область существования результатов решения; IF_Z – интуитивная функция определенной, но явно не ограниченной области применения; $S_{Z\text{Я}}$, S_{ZH} – множества явных и неявных (неформализуемых) аргументов; S_Z – их общее множество (объединение); A_k – область существования явного *k*-го аргумента; a_{kj} – его частное значение; x_k – явно не

определенная область существования неявного *k*-го аргумента; x_{kj} – его частное значение [3].

Характер решающего правила φ_{zi} не может быть предварительно определен вследствие его неоднозначности из-за наличия неявных аргументов. По мере накопления опыта проектирования уровень неформального описания φ_{zi} снижается вследствие уменьшения числа неявных аргументов.

Соотношение *LF*, *OF*, *IF* в функции преобразования R_F различно для каждого конкретного процесса проектирования, но общая закономерность состоит в том, что оно определяется уровнем типизации процесса проектирования, динамикой производственной системы, динамикой жизненного цикла решающей системы и степенью формальности знаний, отражающих исследованность объекта проектирования. При достаточной динамичности областей возможных решений и отсутствии формализованных знаний о проектируемом объекте функция R_F будет состоять из элементов всех трех типов.

МЕХАНИЗМ ОБУЧЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Степень реализации механизмов обучения характеризуется динамикой множества правил преобразования информации (R_F). Динамика R_F состоит в следующем.

При отсутствии типовых решений в процессе проектирования участвуют *OF* и *IF*. Этот случай соответствует тем областям процесса проектирования, где отсутствует значительный положительный практический опыт, т.е. случаю проектирования новых объектов (технологии или изделия). Механизм (алгоритм) обучения автоматизированной системы при этом может быть представлен следующим образом: 1) выявляются оптимальные значения g_i из известных областей G_y при использовании OF_y для определенных значений аргументов; 2) выявляются новые значения g_i из областей G_Z, некоторые неявные аргументы $\bigcup^{\infty} X_{ky}$ и решающие правила получения вариантов для них (*IF*). Таким образом, выявляются новые триады решений, при этом появляются новые знания как об объекте проектирования, так и об аргументах, определяющих его состояние. Это позволит синтезировать и новые правила информационного преобразования пространства поиска решений. Следовательно, можно говорить о работе механизма накопления и корректировке знаний R_M.

При неоднократном практическом подтверждении решений пополняются, помимо интуитивного знания, множества G_x, P_i, S_x, т.е. формируются новые *LF* при накоплении опыта информационного проектирования объекта:

$$R_M : \Delta\left(\bigcup^{k} LF\right) = F_1\left(\bigcup^{m} OF_i, \bigcup^{m} IF_i\right), \tag{11}$$

где $\Delta\left(\bigcup^{k} LF\right)$ – приращение, накопление знаний, охватывающих типовые проектные решения.

Процедуры (10) и (11) описывают процессы первого типа преобразований информации. Для статичных объектов проектирования необходимость в *OF* и *IF* после некоторого временного интервала функционирования отпадает, как и необходимость в корректировке G_x, P_i, S_x. В этом случае процедура поиска решения ограничивается *LF*:

$$R_F = F_2\left(\bigcup^{k} LF_i\right). \tag{12}$$

Выражение (12) описывает вид проектной функции для второго типа преобразования информации, т.е. информационно-поисковые процессы, к которым сводится процесс проектирования. Процессы, имеющие не семантическое, а общеинформационное содержание, относятся к 3-му типу. Структура и функция процессов 4-го и 5-го типов принципиально одинаковые – разница в том, что в первом случае мы говорим о накоплении интуитивных знаний у оператора, а во втором – новых знаний в решающей системе. Если учитывать, что в процессе проектирования участвуют оба элемента, то при укрупненном представлении мы их можем не разделять. Таким образом, процессы 4-го и 5-го типов, описываемые R_M, представляют собой правила накопления знаний:

$$R_M : R_F^2 = F_3\left(\bigcup^n IF, \bigcup^m OF\right); R_{FN} = F_4\left(R_F, R_F^2\right), \tag{13}$$

где R_F^2 – функция преобразования 2-го вида; R_{FN} – новое содержание функции преобразования.

Функция преобразования 2-го вида – достоверное проектное решение, выявленное неоднократной практической проверкой интуитивных решений и решений, полученных с помощью OF. R_{FN} отличается от R_F^2 тем, что в ней обобщены закономерности процесса проектирования, описываемые не только с помощью R_F (ранее имеющихся знаний), но и с использованием R_F^2. Тогда

$$R_{FH} = \left(\left(\bigcup^k LF_i\right)_N \cup \left(\bigcup^m OF_i\right)_N \cup \left(\bigcup^n IF_i\right)_N\right), \tag{14}$$

причем

$$\left(\bigcup^k LF\right)_N = \left(\bigcup^x LF_i\right) \cup \Delta\left(\bigcup^x LF_i\right); \left(\bigcup^m OF\right)_N = \left(\bigcup^y OF_i\right) \cup \Delta\left(\bigcup^y OF_i\right); \tag{15}$$

$$\left(\bigcup^n IF\right)_N = \left(\bigcup^z IF_i\right) \cup \Delta\left(\bigcup^z IF_i\right), \tag{16}$$

где $\Delta\left(\bigcup^x LF_i\right), \Delta\left(\bigcup^y OF_i\right), \Delta\left(\bigcup^z IF_i\right)$ – изменения составляющих R_F.

Из выражений (11) и (13) логически следует

$$R_M : \Delta\left(\bigcup^y OF_i\right) = F_5\left(\bigcup^n IF_i\right) \text{ и } R_M : \Delta\left(\bigcup^z IF_i\right) = F_6\left(\bigcup^n IF_i\right). \tag{17}$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процессы 1-го типа с участием LF, OF, IF являются наиболее общими в механизме А (см. формулы (5), (6), (10)), определяя основу оператора R_F. Механизм Б описывается формулами (11), (13)–(17), отображающими функцию накопления и корректировки знаний R_M.

Модель проектной функции $R = \{R_F, R_M\}$ позволяет учесть в каждом конкретном состоянии $S = \cup A_к$ динамику развития факторов, установленных на момент разработки модели процесса проектирования, и тех, которые будут выявляться при осуществлении процесса проектирования за период его жизненного цикла.

При моделировании *OF* и *IF* используются процедуры (17). Методом экспертных оценок может быть обеспечена их рациональная компоновка в функции преобразования R_F. Формализация *LF* по зависимости (11) выполняется с обоснованным ограничением составляющих ее элементов [3, 7].

Надо представлять, что предлагаемый подход может быть достаточно эффективно реализован в рамках автоматизированных систем поддержки жизненного цикла изделия. Для накопления опыта проектирования и конструирования САПР (этап жизненного цикла – проектирование) должна иметь информационное взаимодействие с автоматизированными системами на этапах изготовления изделия, его испытания и эксплуатации (практический опыт изготовления, испытаний и эксплуатации). Точно так же для накопления опыта проектирования технологических процессов АСТПП должна быть информационно интегрирована в системы на этапе изготовления изделия (опыт реализации технологических процессов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементы показанного подхода были реализованы при создании моделей процесса проектирования в АСТПП, информационно интегрированной в автоматизированную систему управления технологическими процессами.

Методика состояла в следующем:

1. Детали, для которых разрабатывались технологические процессы, разбивались на типы по принципу конструкторской общности – общности конструкторской структуры детали (совокупности элементов детали и геометрических связей между ними).

2. В пределах каждого типа детали разбивались на размерные группы (исходя из размеров поверхностей, определяющих тип детали (для валов это диапазоны длин и диаметров ступеней)).

3. Разрабатывались и опробовались в производстве технологические процессы.

4. При положительном опыте внедрения анализировались технологические процессы, разработанные для деталей одной и той же размерной группы.

5. Выявлялись технологические процессы, имеющие (по оценкам экспертов) принципиально схожую структуру (последовательность и основное содержание операций технологических процессов – маршрут обработки).

6. Для указанных технологических процессов анализировались технологические параметры деталей (размеры, точность и шероховатость поверхностей, вид заготовки, точность взаимного расположения поверхностей, вид термической обработки, материал детали, целевая функция технологического процесса и т.д.). Определялись допустимые диапазоны указанных параметров, определяющих общий (типовой) маршрут обработки детали.

7. Составлялся технологический образ – комплексный чертеж детали с допустимыми диапазонами параметров, соответствующий каждому типовому процессу.

В дальнейшем при соответствии параметров новой детали технологическому образу из базы знаний вызывался соответствующий типовой технологический процесс.

В процессе эксплуатации системы пункты 1–7 постоянно уточняются.

Нельзя не отметить тот факт, что наряду с унификацией технологических решений конструкторским подразделениям давались рекомендации по унификации конструкций деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Э.Ф., Фирман Г.Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М.: Физматлит, 1976. 456 с.

2. Казаков П.В. Автоматизация концептуального проектирования технических систем на основе применения системологии инженерных знаний // *Материалы 9-й национальной конференции по искусственному интеллекту*. Т. 3. М.: Физматлит, 2004. С. 994–1001.

3. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Представление знаний в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами // *Вестник ТГТУ*. 2010. Т. 16. № 2. С. 258–265.

4. Бурдо Г.Б., Палюх Б.В. Повышение эффективности управления технологическими установками в условиях штучного и серийного производства // *Вестник ДонГТУ*. 2009. Т. 9. № 4 (43). С. 659–666.

5. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / под ред. П.И. Ящерицына. Минск: Наука и техника, 1979. 261 с.

6. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Оценка качества решений при проектировании операций механической обработки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 68–76.

7. Fatima A., Nazir N., Khan M.G. Data cleaning in data warehouse: a survey of data pre-processing techniques and tools // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. V. 3. P. 50–61.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Механизм машинного обучения в системах автоматизированного проектирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 66–75.

MACHINE LEARNING MECHANISM IN AUTOMATED DESIGN SYSTEMS

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The article presents the results of a study describing the way knowledge is represented in computer-aided design and process control systems for single and small-scale. Knowledge is proposed to be represented in the form of three types of functions inherent in human thinking. The formation of new knowledge based on previous experience is shown.

Keywords: technological processes, automated design, artificial intelligence, knowledge descriptions.

REFERENCES

1. Popov E.F., Firman G.R. Algoritmicheskie osnovy intellektualnyh robotov i iskusstvennogo intellekta [Algorithmic foundations of intelligent robots and artificial intelligence]. Moscow: Fizmatlit, 1976. 456 p.

2. Kazakov P.V. Automation of conceptual design of technical systems based on the application of systemology of engineering knowledge. *Materialy 9 nacionalnoj konferencii po iskusstvennomu intellektu.* V. 3. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 994–1001. (In Russian).

3. Palukh B.V., Burdo G.B. Knowledge representation in computer-aided design and process control systems. *Vestnik TGTU*. 2010. V. 16. No. 2, pp. 258–265. (In Russian)

4. Burdo G.B., Palyuh B.V. Improving the efficiency of control of technological installations in the conditions of piece and serial production. *Vestnik DonGTU*. 2009. V. 9. No. 4 (43), pp. 659–666. (In Russian).

5. Cvetkov V.D. Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizaciya proektirovaniya tekhnologicheskih processov [System-structural modeling and design automation of technological processes] / ed. P.I. Yashchericyna. Minsk: Nauka i tekhnika, 1979. 261 p.

6. Bolotov A.N., Burdo G.B. Assessment of the quality of solutions in the design of machining operations. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*. 2020. No. 4 (8), pp. 68–76. (In Russian).

7. Fatima A., Nazir N., Khan M.G. Data cleaning in data warehouse: A survey of data pre-processing techniques and tools. *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. V. 3, pp. 50–61.

Поступила в редакцию/received: 19.07.2021;
после рецензирования/revised: 27.09.2021; принята/accepted: 01.10.2021