

Машиностроение и машиноведение

УДК 004.624

doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-3-14

Интеллектуальная система полуавтоматического проектирования цилиндрических редукторов с выбором лучших решений

Г.Б. Евгеньев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Intelligent System of Semi-Automatic Design of Cylindrical Gear Reducers with a Choice of Best Solutions

G.B. Evgenev

Bauman Moscow State Technical University

Трудоемкость, стоимость и качество результатов проектирования определяются объемом и глубиной инженерных знаний, заложенных в компьютер. Интеллектуальная технология компьютеризации инженерной деятельности дает возможность специалисту, не обладающему глубокими познаниями в информатике, без помощи программистов создавать для себя и своих коллег специализированные рабочие места. При этом инженерная деятельность претерпевает качественные изменения: специалист вводит в компьютер данные технического задания и наблюдает за процессом генерации проекта, принимая принципиальные творческие решения путем выбора из вариантов, предлагаемых компьютером. Подобные системы с полным основанием можно отнести к принципиально новой категории полуавтоматических систем проектирования. Рассмотрена технология разработки полуавтоматических систем проектирования цилиндрических редукторов с обеспечением поиска лучших решений с помощью генетических алгоритмов. Актуальность этой темы связана с тем, что создание интеллектуальных систем конструирования изделий является важным направлением совершенствования инженерной подготовки машиностроительного производства. Использование таких систем позволяет повысить производительность и качество работы конструкторов благодаря полуавтоматической генерации 3D-моделей изделий в условиях типового вариантного проектирования.

Ключевые слова: искусственный агент, многоагентные системы, полуавтоматическое проектирование, инструментальное программное средство

The complexity and cost of design, as well as the quality of its results, are determined by the volume and depth of engineering knowledge embedded in a computer. The intellectual technology of computerization of engineering activity enables specialists who does not possess deep knowledge of computer science to create specialized workstations for themselves

and their colleagues. At the same time, the engineering activity undergoes qualitative changes: the specialist enters technical specifications into a computer and oversees the project generation process, making fundamental creative decisions by selecting one of the options offered by the computer. Such systems with good reason can be attributed to a fundamentally new category of semi-automatic design systems. This paper examines the technology of creating semi-automatic systems for designing cylindrical gear reducers with an option of searching for the best solutions using genetic algorithms. The relevance of this topic is related to the fact that creation of intelligent systems for product design is an important direction in improving the engineering development of machine-building production. Such systems can increase the productivity and quality of designers' work due to the semi-automatic generation of 3D models of products in typical variant design.

Keywords: artificial intelligence, multiagent systems, semi-automatic CAD, software tools

Многоагентные методологии. Среди методологий создания интеллектуальных систем (ИС) наиболее прогрессивной является многоагентная [1–5]. Любой искусственный агент (ИА) представляет собой открытую систему, помещенную в некоторую среду, в качестве которой, как правило, выступает проект, формируемый в базах данных [6–8].

Свойства ИА могут принадлежать к трем различным категориям: импортируемым, экспортируемым и внутренним. Импортируемые свойства являются *рецепторами* ИА, формирующими его систему *восприятия*, а экспортируемые — его *эфекторами*, функция которых состоит в воздействии на среду, т. е. на состояние проекта.

Свойства ИА всех трех категорий образуют его *память*, где хранится текущее состояние ИА.

Процессор ИА формируют его методы, обеспечивающие объединение и переработку разнородных данных, выработку соответствующих реакций на информацию о состоянии среды (проекта), принятие решений о выполнении тех или иных действий. В целом процессор определяет *поведение* ИА. Поведение можно наблюдать, используя инспектор модели ИА, с помощью которого пользователь следит за состоянием свойств ИА, либо в графическом окне, где отображаются сгенерированные 3D-модели, чертежи и другая геометрическая информация [6].

В статье [5] отмечено, что многоагентные программные средства рассматриваются как промежуточные, позволяющие решать различные вспомогательные проблемы прикладных систем. Эта работа принципиально отличается от упомянутых публикаций, так как в ней многоагентная методология представлена как всеобъемлющий подход к созданию прикладных систем.

Концептуально ИА представляет собой объект-функцию [7].

Диаграмма прецедентов работы системы конструирования. На рис. 1 приведена диаграмма прецедентов работы системы конструирования, где отображены ее действия (функции) и их исполнители. На диаграмме описаны две роли: заказчик и разработчик, а также три функции: разработать техническое задание (ТЗ), проектировать и конструировать изделие, изготовление деталей на 3D-принтере.

Цель работы — сокращение трудоемкости проектно-конструкторских работ путем автоматизации процессов, повышение качества результатов на основе использования баз знаний (БЗ), разработанных высококвалифицированными специалистами, и создание методологии, позволяющей генерировать демонстрационные прототипы изделий с помощью аддитивных технологий.

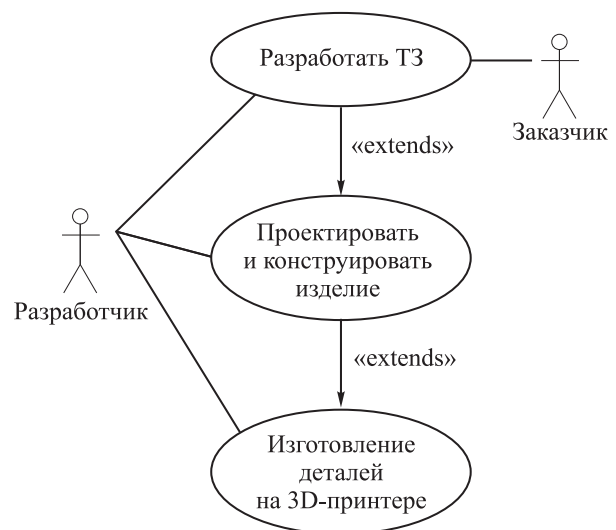


Рис. 1. Диаграмма прецедентов работы системы конструирования

Как видно из диаграммы, разработанная интегрированная интеллектуальная система проектирования (ИСП) редукторов реализует все функции расчетчика и конструктора. Функции всех специалистов перешли к разработчику, и опять-таки выполняются им посредством системы. Кроме того, система реализует поддержку разработчика при принятии решений.

Разработаны метод и средство, позволяющие генерировать 3D-модели с помощью продукционных БЗ [9–13]. На первой фазе проектирования изделие представляют как формальную систему с оформлением соответствующих схем и эскизной проектной документации. На этом этапе проводят разнообразные инженерные расчеты для анализа геометрии, моделирования и изучения поведения изделия, для совершенствования и оптимизации его конструкции.

На основе проектных расчетов, с помощью которых определяют основные характеристики изделия, выполняют конструирование, основной задачей которого является построение модели изделия как объекта производства с получением необходимого комплекта чертежей и спецификаций. В качестве средства конструирования используют САД-системы.

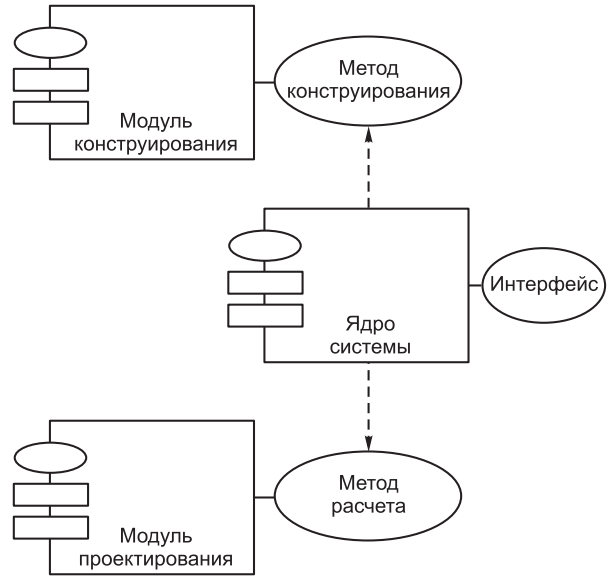


Рис. 2. Диаграмма компонентов ИС проектирования и конструирования редукторов

Диаграмма компонентов ИС. На рис. 2 приведена диаграмма компонентов ИС проектирования и конструирования редукторов.

Как видно из диаграммы интегрированная ИСП редукторов включает в себя следующие программные компоненты: ядро системы, модули проектирования и конструирования.

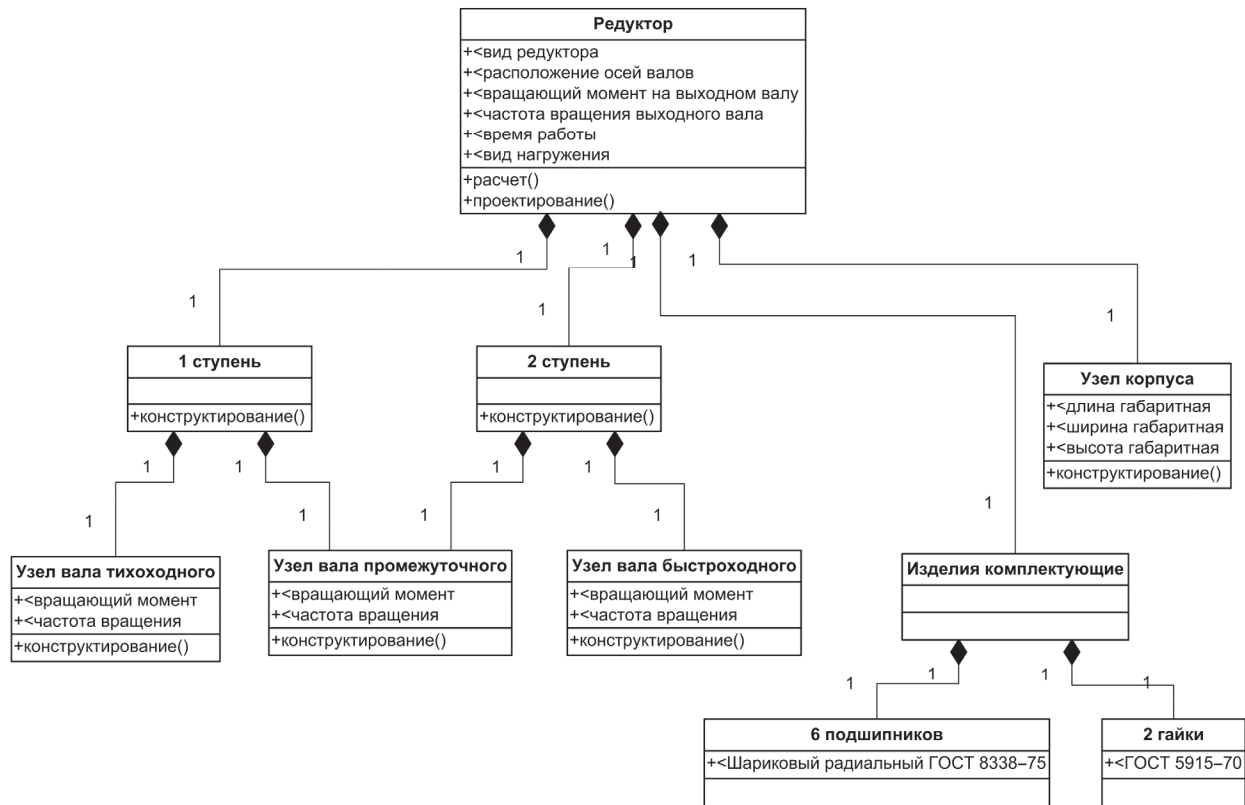


Рис. 3. Диаграмма классов двухступенчатого цилиндрического редуктора

Диаграммы классов объектов. На диаграммах классов, применяемых при моделировании объектно-ориентированных систем, показано множество классов, интерфейсов, коопераций и отношений между ними. Такие диаграммы используют для представления статического вида системы с точки зрения проектирования. Сюда по большей части относится моделирование словаря системы, коопераций и схем. Диаграммы классов важны для визуализации, спецификации и документирования структурных моделей, а также для прямого и обратного проектирования исполняемых систем.

Классы — это самые важные строительные блоки любой объектно-ориентированной системы, представляющие собой описание совокупности объектов с общими атрибутами, операциями, отношениями и семантикой. Класс реализует один или несколько интерфейсов. Классы используют для составления словаря разрабатываемой системы. Это могут быть абстракции, являющиеся частью предметной области, либо классы, на которые опирается реализация. С их помощью описывают программные, аппаратные или чисто концептуальные сущности.

Системы базируются на знаниях, которые отражены с помощью диаграммы классов. На рис. 3 приведена диаграмма классов двухступенчатого цилиндрического редуктора.

Как видно из диаграммы в состав двухступенчатого редуктора входят:

- первая ступень с узлами валов — тихоходного и промежуточного;
- вторая ступень с узлами валов — промежуточного и быстроходного;
- узел корпуса;
- изделия комплектующие — шесть подшипников и две гайки, соответствующие ГОСТ 8383–75 и ГОСТ 5915–70.

Классы узлов надо декомпозировать до уровня деталей, методы которых должны обеспечивать их конструирование (рис. 4, 5). Для решения конструкторско-технологических задач часто требуется включить в диаграммы классов деталей модели их конструкторско-технологических элементов. На рис. 4 класс «Вал-шестерня» декомпозирован с включением участков для нарезания зубьев и посадки подшипников, концевого участка.

Приведенные диаграммы классов, разрабатываемые в процессе технического проектирования, на этапе рабочего проектирования

должны быть преобразованы в программные средства. В описываемой технологии таким средством служит система Sprut-X [7].

Разработка модуля проектирования привода.

Модуль определения основных параметров редуктора реализован в виде БЗ с методом их расчета, который будет являться интерфейсом для взаимодействия с ядром интегрированной ИСП редуктора.

Формирование БЗ, проведенное в инструментальной среде Sprut ExPro [7, 9], включало в себя создание словаря БЗ, ассоциативных списков значений, модулей инженерных знаний (МИЗ) и методов.

Далее приведено сгенерированное документатором системы экспертного программирования Sprut ExPro текстовое представление модуля расчета числа передаточного, соответствующее изображению модуля RsUrz на рис. 6.

МЗ: "RsUrz" — Расчет числа передаточного

Предусловия запуска

Имя	Наименование	Тип	Условие
VidSE	Вид CE	STRING	Редуктор
nt	Частота вращения на выходе, об/мин	REAL	(0,)

Входные свойства

Имя	Наименование	Тип	Значение
nv_ed	Частота вращения на входе, об/мин	REAL	
nt	Частота вращения на выходе, об/мин	REAL	

Механизм — Формула

$$Ur_z = nv_ed/nt$$

Выходные свойства

Имя	Наименование	Тип	Значение
Ur_z	Передаточное число	REAL	

Конечным этапом формирования БЗ стало создание методов: PrPriv — проектирования привода, RsCilRed — расчета основных параметров редуктора, RsKryshki — расчета параметров крышек, RsKolesa — расчета параметров колес. Структура методов PrPriv, RsCilRed, RsKryshki и RsKolesa приведена в виде диаграмм компонентов в нотации UML (см. рис. 6). Компонентами служат МИЗ БЗ. В качестве интерфейса выступают переменные БЗ.

Выходным интерфейсом метода PrPriv являются: Mt — крутящий момент на выходном валу; nt — частота вращения на выходе редуктора; TypRed — тип редуктора; Urz — заданное

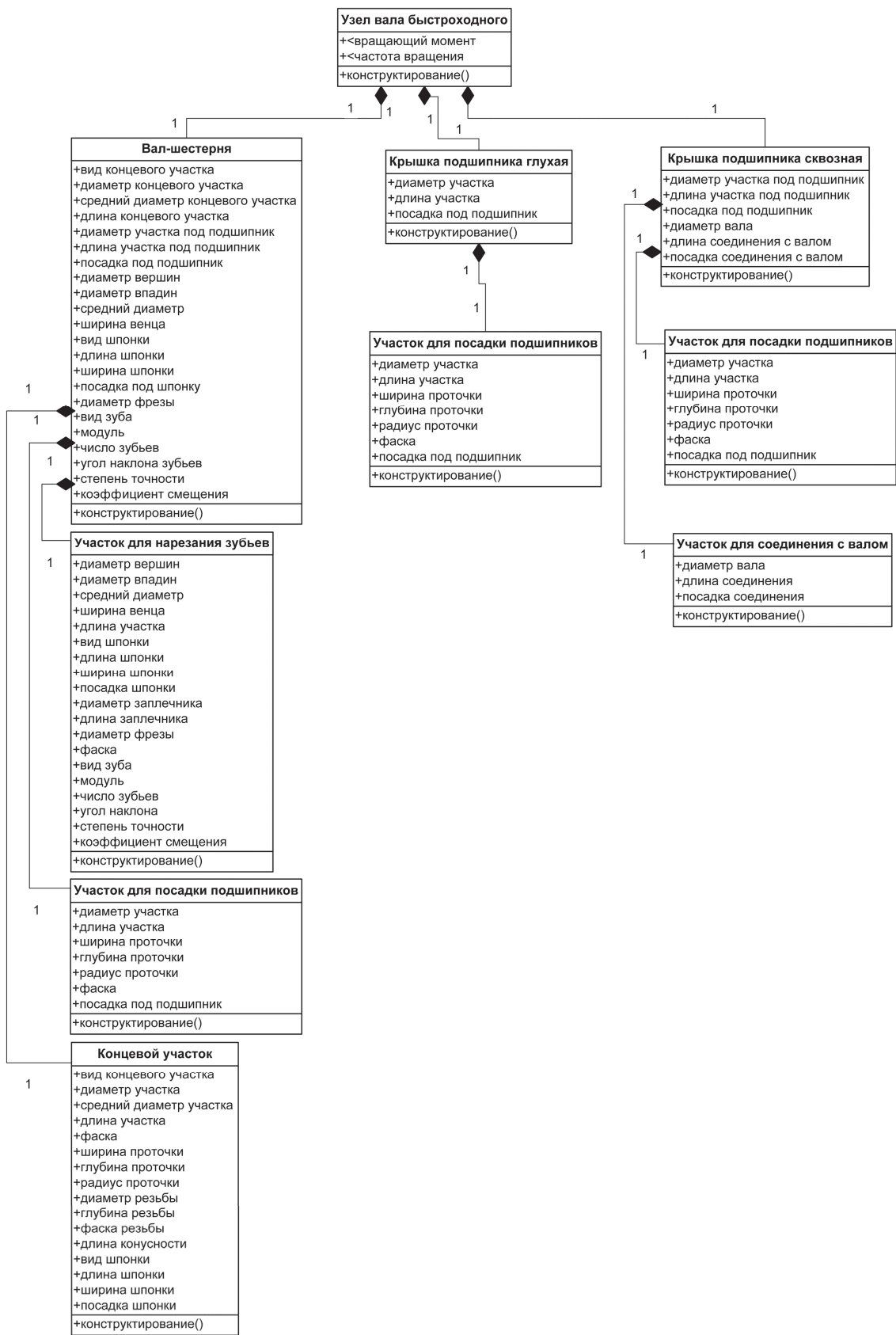


Рис. 4. Диаграмма классов узла вала быстроходного



Рис. 5. Диаграмма классов узла корпуса цилиндрических редукторов

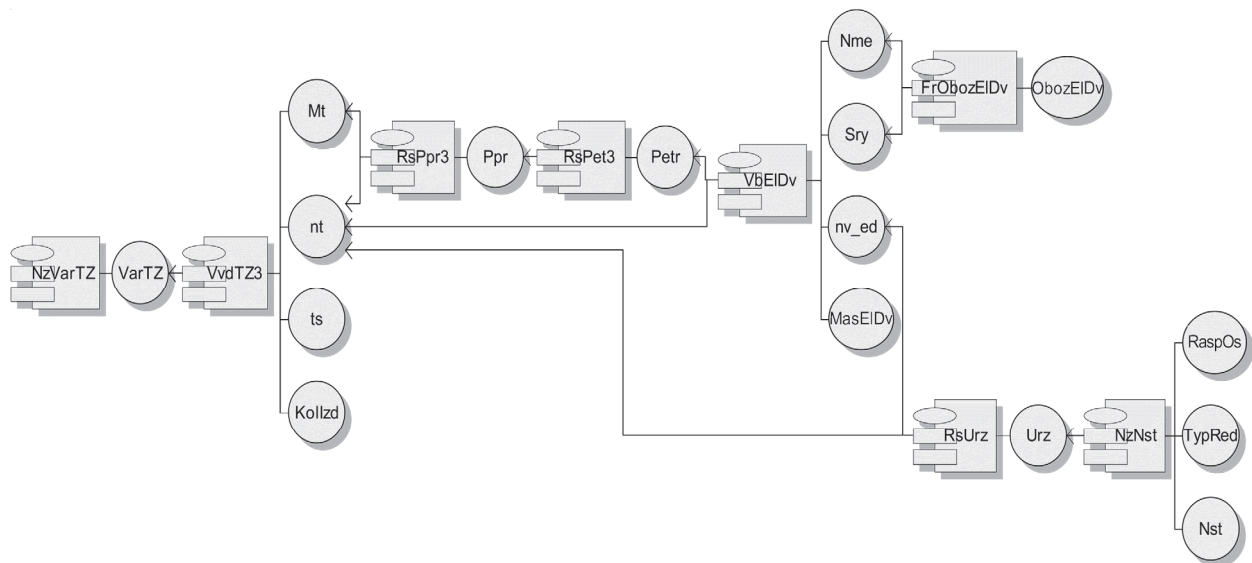


Рис. 6. Диаграмма компонентов метода:

NzVarTZ — модуль назначения Т3; VarTZ — интерфейс «вариант Т3»; VvdTZ3 — модуль ввода Т33; RsPpr3 — модуль назначения параметров привода по Т33; Ppr — параметры привода; RsPet3 — модуль расчета параметров привода по Т33; VbEIDv, Nme, Sry, nv_ed и MasEIDv — выбор, наименование, серия, частота вращения и масса электродвигателя соответственно; FrObozEIDv и ObozEIDv — формирование обозначения и обозначение электродвигателя, Urз и RsUrз — установочные размеры электродвигателя и их расчет; NzNst — назначение стандартных параметров; RaspOs — оси; TypRed — тип редуктора; Nst — количество ступеней

передаточное число редуктора; RaspOs — расположение входной и выходной осей; Nst — количество ступеней; Kollzd — количество изделий; ts — ресурс передачи; OboznRed — обозначение редуктора. Перечисленные параметры вычисляются в результате работы МИЗ RsPriv, предназначенного для расчета привода.

С помощью диаграммы удобно отслеживать ранжирование МИЗ (ранг МИЗ в методе RsPriv

равен числу промежуточных интерфейсов, через которые МИЗ связан с методом). МИЗ с наибольшим рангом (крайние снизу компоненты) осуществляют ввод исходных данных для расчета, причем их возможные значения выбираются из базы данных.

Инструментальное программное средство Sprut ExPro (рис. 7), в котором проектировалась БЗ, позволяет создавать документацию на раз-

работанные методы БЗ. На рис. 8 приведен эскизный чертеж спроектированного редуктора.

Сгенерированные в процессе проектирования 3D-модели деталей и узлов с помощью 3D-принтера позволяют изготавливать объемную реализацию изделия. На рис. 9 показан вид отпечатанного на принтере одноступенчатого цилиндрического редуктора.

Функциональная модель ИСП. На рис. 10 приведена функциональная модель ИС полуав-

томатического 3D-проектирования цилиндрического редуктора. На входе системы имеется ТЗ, которое вводят через интерфейс модуль «Ввод исходных данных ТЗ». В нем задают значения вращающего момента на выходном валу (Н·м), частоты вращения на выходе (об/мин), ресурса передачи (ч) и количества изделий (шт.). Последний параметр необходим для проектирования технологических процессов.

Для управления работой полуавтоматической системы проектирования и конструирова-

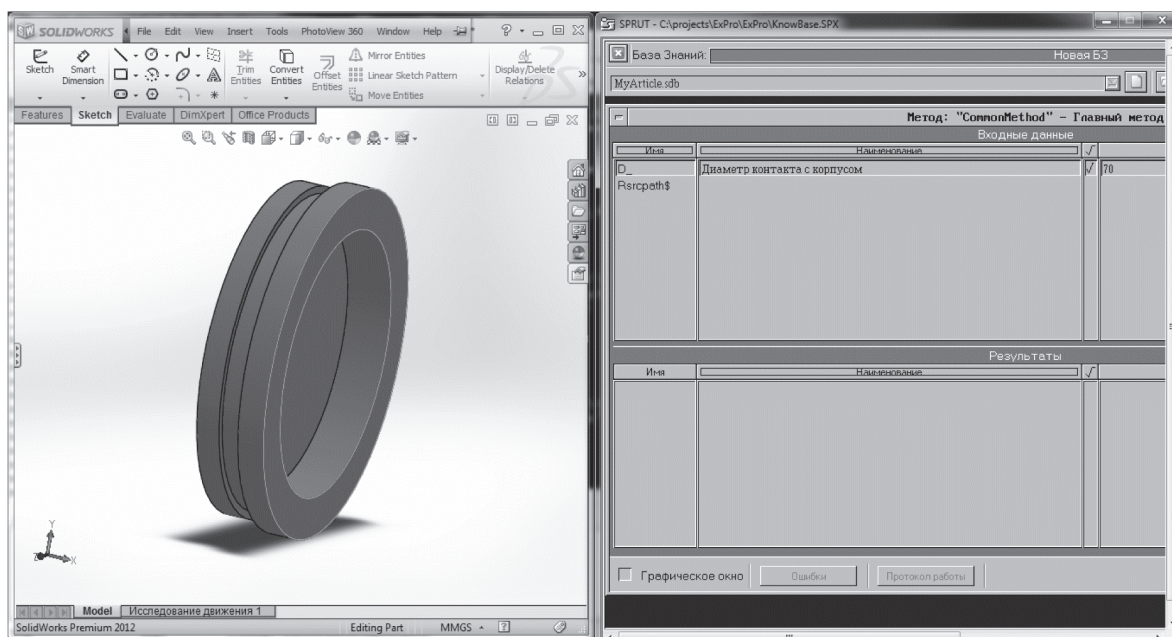


Рис. 7. Модуль знаний 3D-проектирования крышки подшипников

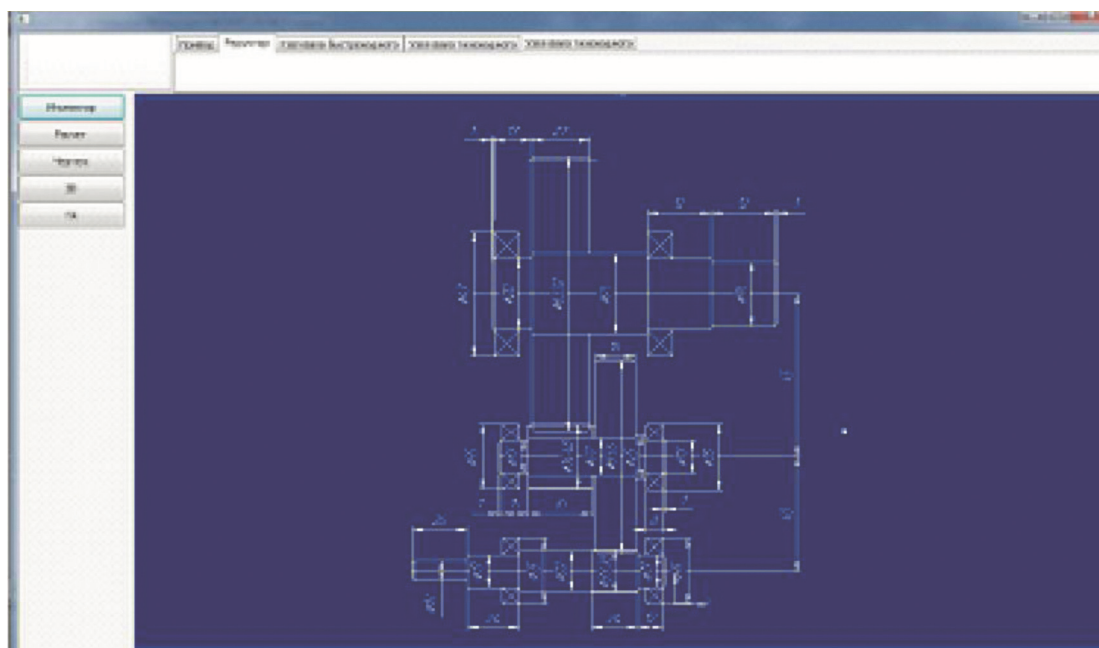


Рис. 8. Эскизный чертеж спроектированного редуктора

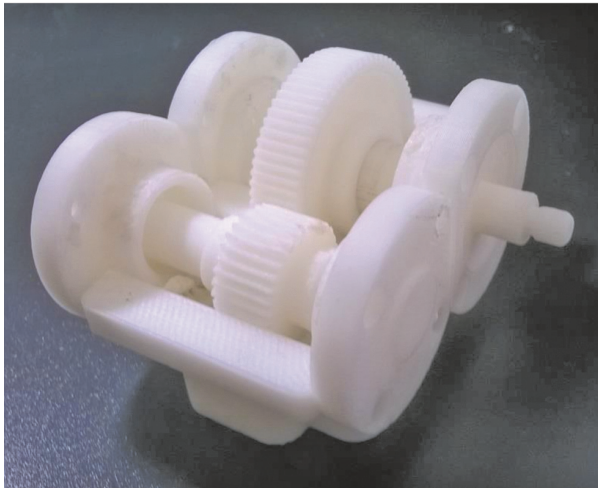


Рис. 9. Результаты 3D-печати одноступенчатого редуктора

ния изделий машиностроения БЗ задает разработчику ряд вопросов, в том числе о выборе модели электродвигателя, вида зуба колес, варианта термообработки колес, материалов колес и т. д.

На выходе системы генерируется 3D-модель изделия.

Диаграмма совместной работы ИСП и генетического алгоритма. Генетические алгоритмы (ГА) — это поисковые процедуры, основанные на компьютеризации механизмов естественного отбора и генетики.

Поисковые процедуры в проектировании необходимы для принятия решений на основе многоагентных моделей технических объектов (ТО). Такие модели в теории ГА представляют собой совокупность существенных качественных и количественных свойств. Качественные свойства, например, варианты структурных решений, должны быть закодированы в форме целых чисел, а количественные — объективно измеримы и представлены в числовой форме.

Свойства ТО могут быть разделены на два класса: входные $X = (x_1, \dots, x_n)$ и выходные (производные) $Y = (y_1, \dots, y_s)$. Входные свойства изменяются в пределах допустимой области поиска DX , при этом любой вектор X , принадлежащий множеству DX называют допустимым решением. Производные свойства Y можно только вычислять, а непосредственно изменять нельзя. Применительно к функциональным моделям в стандарте IDEF0 свой-



Рис. 10. Функциональная модель ИС полуавтоматического 3D-проектирования цилиндрического редуктора

ства X являются входными переменными функционального блока — ИСП, а производные Y — выходными.

Например, при проектировании цилиндрических редукторов с заданным передаточным числом в состав входных переменных входят: вращающий момент, частота вращения на выходе редуктора и ресурс передачи.

Область поиска Dx , определяемая ТЗ на проектирование, имеет место, когда в нем имеются диапазоны допустимого изменения переменных. При проектировании редукторов перечисленные входные переменные задаются, как правило, однозначно, вследствие чего область поиска Dx отсутствует.

В ИСП производными переменными являются результаты конструирования (конструкторские документы), а также геометрические и объектные модели ТО.

С другой стороны, всегда есть набор *внешних параметров* $C = (c_1, \dots, c_m)$, характеризующих внешнюю по отношению к ТО среду и оказывающих влияние на его работу. Применительно к функциональным моделям в стандарте IDEFD0 в качестве внешних параметров выступают управляющие переменные.

В ИСП внешние параметры задает человек по запросам компьютера. При проектировании цилиндрических редукторов в состав внешних параметров входит выбор материала и термообработки колес, схемы редуктора и подшипников.

Акт принятия решения при проектировании заключается в определении конкретных значений внешних параметров C_k ($k = 1, 2, \dots, p$), а также варьируемых входных свойств ТО X_{vj} ($j = 1, 2, \dots, q$), если таковые имеются:

$$G = \langle X_{v1}, X_{v2}, \dots, X_{vp}, C_1, C_2, \dots, C_q \rangle.$$

Для выбора из области допустимых решений Ω^* одного или нескольких лучших ТО вводят функцию ценности или *критерий оптимальности* φ — количественный показатель, посредством которого осуществляется объективное измерение в некоторой числовой шкале Z какого-либо одного самого важного для задачи принятия решения выходного параметра y_i или свертки таких параметров.

Здесь под измерением по шкале Z понимается отображение φ , которое каждому решению ω_i из множества допустимых Ω^* ставит в соответствие числовую оценку $\varphi \in Z$. Механизм выбора лучшего решения сводится к отбору только тех решений, которые обеспечивают, например, наименьшее значение критерию оптимальности в области поиска Ω^* :

$$\varphi^* = \varphi(\omega_i^*) = \min \varphi(\omega_i^*),$$

где φ^* — наименьшее значение критерия оптимальности; ω_i^* — оптимальное решение.

Это выражение является математической зависимостью модели принятия оптимального решения, называемой *экстремальной задачей однокритериального выбора*. В случае конечно-

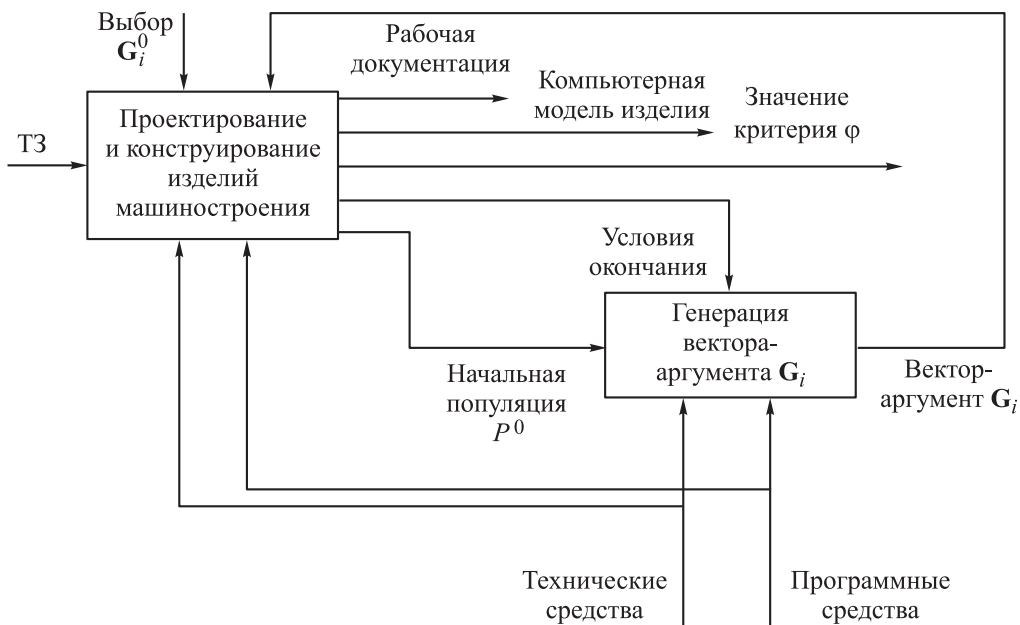


Рис. 11. Функциональная схема совместной работы ИСП и ГА

го числа допустимых решений $\omega_i \in \Omega^*$ эта задача относится к классу *экстремальных задач переборного типа*, для решения которых предназначены ГА.

Например, при конструировании цилиндрического редуктора в качестве критерия оптимальности может быть выбрана его масса. При этом экстремальная задача сведется к перебору всех вариантов кинематических схем редукторов, марок материалов колес и их термообработки, а также подшипников, имеющих в распоряжении конструктора.

Если количество вариантов невелико, то такую задачу можно решить непосредственно путем перебора. Необходимость в ГА возникает, когда экстремальная задача переборного типа слишком велика, вследствие чего ее нельзя решить непосредственно за приемлемое время.

С точки зрения стандарта функционального анализа IDEF0 ИСП представляет собой механизм M , обеспечивающий генерацию допустимых решений ω_i на основе исходных данных G . В связи с этим критериальная функция для ГА приобретает вид

$$\varphi = M(G).$$

Это — скалярная функция векторного аргумента. Таким образом, G представляет собой вектор-аргумент.

В задачах ГА каждый компонент вектора G_i может быть закодирован с помощью целого неотрицательного числа.

На рис. 11 приведена функциональная схема совместной работы ИСП и ГА для поиска наилучших решений. Начальная популяция P^0 генерируется в полуавтоматическом режиме человеком с использованием многоагентной системы проектирования на основе ТЗ с выбо-

ром компонентов вектора-аргумента G_i^0 в процессе описанного диалога.

Для каждого полученного варианта решения рассчитываются значения критерия φ . После завершения этого процесса запускается ГА, выполняющий автоматическую генерацию последующих векторов-аргументов G_i , с помощью которых ИСП в автоматическом режиме продолжает формировать новые решения с расчетом значений критерия φ . После окончания этого процесса выбирается решение с лучшим значением критерия.

Выводы

1. Разработана онтологическая многоагентная методология создания интегрированных ИС для полуавтоматического проектирования цилиндрических редукторов с генерацией 3D-моделей и выбором лучших решений.

2. Концептуально ИА представляет собой объект-функцию, которая отличается от представления классов UML разделением атрибутов на подмножества входных и выходных. В связи с этим на этапе концептуального проектирования системы могут быть использованы диаграммы классов UML с добавлением к наименованиям атрибутов символов входных и выходных переменных.

3. Предложены метод и средство, позволяющие генерировать 3D-модели с помощью продукционных БЗ, представляющих методы ИА.

4. Построена функциональная модель ИС полуавтоматического 3D-проектирования.

5. Разработаны принципы совместной работы ИСП и ГА, позволяющие автоматизировать поиск лучшего варианта проектируемого изделия.

Литература

- [1] Müller J.P., Ketter W., Kaminka G., Wagner G., Bulling N. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, no. 158739, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3
- [2] Braubach L., Pokar A., Kalinowski J., Jander K. Tailoring Agent Platforms with Software Product Lines. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 3–21, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_1
- [3] Hrabia C.-E., Masuch N., Albayrak S. A Metrics Framework for Quantifying Autonomy in Complex Systems. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 22–41, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_2
- [4] Diaconescu I.M., Wagner G. Modeling and Simulation of Web-of-Things Systems as Multi-Agent Systems. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 137–153, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_8

- [5] Bender J., Kehl S., Muller J.P. A Comparison of Agent-Based Coordination Architecture Variants for Automotive Product Change Management. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 249–267, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_14
- [6] Евгеньев Г.Б. *Интеллектуальные системы проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 420 с.
- [7] Евгеньев Г.Б., ред. *Основы автоматизации технологических процессов и производств. В 2 т. Т. 1: Информационные модели. Т. 2: Методы проектирования и управления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 441 с., 479 с.
- [8] Тарасов В.Б. *От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика*. Москва, Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
- [9] СПРУТ Технология. URL: <https://sprut.ru/> (дата обращения 15 августа 2019).
- [10] Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Интеллектуальные системы полуавтоматического проектирования и быстрого прототипирования изделий машиностроения. *Евразийский Союз Ученых, Технические науки*, 2015, № 9(18), с. 19–25.
- [11] Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Метод создания геометрических баз знаний. *Инженерный вестник*, 2016, № 1, с. 1201–1218. URL: <http://ainjournal.ru/doc/832611.html> (дата обращения 15 сентября 2019).
- [12] Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Разработка интеллектуальной системы трехмерного проектирования деталей. Часть 2. *Инженерный вестник*, 2016, № 2, с. 520–534. URL: <http://ainjournal.ru/doc/834324.html> (дата обращения 15 сентября 2019).
- [13] Евгеньев Г.Б. Полуавтоматические системы типового вариантного проектирования. *Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сб. науч. тр. по итогам международной научно-практической конференции*, Новосибирск, 7 февраля 2016, Новосибирск, ИЦРОН, 2016, вып. 3, с. 9–14.

References

- [1] Müller J.P., Ketter W., Kaminka G., Wagner G., Bulling N. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, no. 158739, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3
- [2] Braubach L., Pokar A., Kalinowski J., Jander K. Tailoring Agent Platforms with Software Product Lines. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 3–21, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_1
- [3] Hrabia C.-E., Masuch N., Albayrak S. A Metrics Framework for Quantifying Autonomy in Complex Systems. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 22–41, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_2
- [4] Diaconescu I.M., Wagner G. Modeling and Simulation of Web-of-Things Systems as Multi-Agent Systems. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 137–153, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_8
- [5] Bender J., Kehl S., Muller J.P. A Comparison of Agent-Based Coordination Architecture Variants for Automotive Product Change Management. *Multiagent System Technologies. 13th German Conference*, 28–30 September 2015, Cottbus, Germany, 2015, pp. 249–267, doi: 10.1007/978-3-319-27343-3_14
- [6] Evgenev G.B. *Intellektual'nyye sistemy proyektirovaniya* [Intelligent design systems]. Moscow, Bauman Press, 2012. 420 p.
- [7] *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv. T. 1: Informatsionnye modeli. T. 2: Metody projektirovaniia i upravleniia* [Fundamentals of automation of technological processes and productions. Vol. 1: Information models. Vol. 2: Methods of design and management]. Ed. Evgenev G.B. Moscow, Bauman Press, 2015. 441 p., 479 p.
- [8] Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow, Editorial URSS publ., 2002. 352 p.

- [9] *SPRUT Tekhnologiya* [SPRUT Technology]. Available at: <https://sprut.ru/> (accessed 15 August 2019).
- [10] Evgenev G.B., Kokorev A.A., Pirimyashkin M.V. Intelligent systems for semi-automatic design and rapid prototyping of engineering products. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh, Tekhnicheskkiye nauki*, 2015, no. 9(18), pp. 19–25 (in Russ.).
- [11] Evgenev G.B., Kokorev A.A., Pirimyashkin M.V. Method for creating geometric knowledge bases. *Engineering Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 1201–1218 (in Russ.). Available at: <http://ainjournal.ru/doc/832611.html> (accessed 15 September 2019).
- [12] Evgenev G.B., Kokorev A.A., Pirimyashkin M.V. Development of an intelligent system for three-dimensional design of parts. Part 2. *Engineering Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 520–534. Available at: <http://ainjournal.ru/doc/834324.html> (accessed 15 September 2019).
- [13] Evgenev G.B. Semi-automatic systems of typical variant design. *Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sb. nauch. tr. po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of technical sciences in Russia and abroad. Collection of scientific papers following the results of the international scientific-practical conference]. Novosibirsk, 2016, iss. 3, pp. 9–14.

Статья поступила в редакцию 08.11.2019

Информация об авторе

ЕВГЕНЕВ Георгий Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: g.evgenev@mail.ru).

Information about the author

EVGENEV Georgiy Borisovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Computer Systems for Industrial Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: g.evgenev@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Евгеньев Г.Б. Интеллектуальная система полуавтоматического проектирования цилиндрических редукторов с выбором лучших решений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-3-14

Please cite this article in English as:

Evgenev G.B. An Intelligent System of Semi-Automatic Design of Cylindrical Gear Reducers with a Choice of Best Solutions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 4, pp. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-3-14