

Курейчик Виктор Михайлович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kur@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)393-260.

Заместитель руководителя по научной работе; профессор.

Kureychik Viktor Mihailovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kur@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)393-260.

Deputy head on scientific work; professor.

УДК 519.7:004.8 + 004.8.023; 004.81.85

В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, С.И. Родзин

**КОНЦЕПЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ,
ИНСПИРИРОВАННЫХ ПРИРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ***

В статье выдвигаются гипотезы и устанавливаются закономерности эволюционных вычислений. Формулируются основные положения и концепции эволюционных вычислений, предлагается их общая модель. Разрабатывается структура системы и базовый цикл алгоритма эволюционных вычислений.

Эволюционные вычисления; концепция; репродукция; селекция.

V.V. Kureichik, V.M. Kureichik, S.I. Rodzin

**CONCEPT EVOLUTIONARY COMPUTATION IS INSPIRED BY NATURAL
SYSTEMS**

The paper puts forward a hypothesis and establish regularities of evolutionary computation. Formulated the basic provisions and concepts of evolutionary computation, the total proposed model. A system structure and the basic cycle of evolutionary computation algorithm.

Evolutionary computation, vision, reproduction, selection.

Введение. Термин «эволюционные вычисления» (ЭВ) в искусственном интеллекте подразумевает использование для решения разнообразных задач проектирования, оптимизации, прогнозирования и управления совокупности алгоритмических, программных, аппаратных средств и приближенных эвристических методов, основанных на имитации механизмов эволюции для синтеза структур обработки данных, а также на статистическом подходе к исследованию ситуаций и итерационном приближении к искомому решению [1]. Идеи эволюции и самоорганизации оказались чрезвычайно плодотворными и на практике доказали свою непримитивность.

* Работа выполнена при поддержке: РФФИ (гранты № 07-01-00174, № 09-01-00492), г/б № 2.1.2.1652.

В моделях и алгоритмах ЭВ ключевым элементом конструкции являются построение начальной модели и правил, по которым она может изменяться (эволюционировать). В течение последних 50 лет были предложены разнообразные схемы ЭВ: генетический алгоритм, генетическое программирование, эволюционные стратегии, эволюционное программирование, модели поведение роя пчел, стаи птиц и колонии муравьев, модели отжига или потока и другие конкурирующие эвристические алгоритмы. Необходима общая концепция и единый методологический подход к построению ЭВ, инспирированных природными системами [2].

Гипотезы эволюционных вычислений.

Гипотеза 1. В отличие от точных методов математического программирования, методы ЭВ позволяют находить решения близкие к оптимальным за приемлемое время; в отличие от других эвристических методов оптимизации алгоритмы ЭВ характеризуются существенно меньшей зависимостью от особенностей приложения, являются более универсальными и обеспечивают лучшую степень приближения к оптимальному решению.

Гипотеза 2. Универсальность ЭВ определяется также их применимостью к решению разнообразных прикладных задач, у которых фазовое пространство переменных не обязательно является метрическим.

Гипотеза 3. Алгоритмы ЭВ, с точки зрения преобразования информации, представляют собой не просто случайный поиск, а последовательное преобразование множества решений, поскольку используют информацию, накопленную в процессе эволюции.

Гипотеза 4. Эволюционное моделирование представляет собой экспериментальный способ решения задач, в которых связь оптимизируемых параметров объектов с управляемыми и наблюдаемыми параметрами сложна и не всегда может быть выражена аналитически.

Гипотеза 5. Применение ЭВ эффективно в задачах, где необходимо получить всю историю поведения системы, ее эволюцию в целом.

Сопоставительный анализ различных базовых моделей ЭВ, гипотез, лежащих в основе этих моделей, и формализованных способов их описания позволяет говорить о следующих закономерностях.

Закономерность 1. Ключевым элементом формализованных моделей ЭВ, инспирированных природными системами, является построение начальной модели, а также правил, по которым она эволюционирует, и подходов к представлению (кодированию) решений.

Закономерность 2. Модели ЭВ применимы к решению трудных задач проектирования, оптимизации, прогнозирования и управления, у которых переменные могут быть лингвистическими и не иметь количественного выражения.

Закономерность 3. ЭВ моделируют процесс поиска оптимальных решений посредством эволюционных операторов селекции, репродукции, мутации и др., поддерживают популяцию структур, которая эволюционирует в окружающей среде в соответствии с операторами. Селекция фокусирует внимание на отборе индивидуумов с более высокими значениями целевой функции, а репродукция, мутация и другие операторы генерируют новых индивидуумов.

Закономерность 4. Модели отжига, пороговая, потоковая и рекордных оценок имеют наибольшую степень сходства с моделями эволюционных стратегий и эволюционного программирования. Однако имеются и отличия: размер популяции решений в конкурирующих эвристических моделях равен единице или двум; поиск решений ведется локально от точки к точке; мутация является единственным оператором поиска, а селекция проводится по специальным правилам.

Закономерность 5. Все базовые модели ЭВ представляют собой итерационные эвристические процедуры, не имеют ограничений на вид целевой функции.

Закономерность 6. Популяция в моделях ЭВ играет роль памяти о структуре пространства поиска решений. Память не обязательно ограничивается лишь последними лучшими решениями.

Закономерность 7. Используя различные механизмы, инспирированные природными системами, например, «план охлаждения» в модели отжига, или аналогичные механизмы в пороговой и потоковой моделях, в модели рекордных оценок, можно эффективно управлять скоростью сходимости процесса поиска. Однако эти процедуры не обладают свойством параллелизма, который, наоборот, является отличительной чертой генетических и роевых моделей.

Закономерность 8. Модели ЭВ являются инструментом исследования, способным конкурировать с другими методами поиска оптимальных решений по качеству получаемых решений в сочетании с трудоемкостью их получения.

Закономерность 9. Различия в базовых моделях ЭВ не носят методологический характер и не затрагивают фундаментальные принципы, присущие эволюции независимо от формы и уровня абстракции модели.

Это позволяет говорить о возможности значительного расширения круга задач, успешно решаемых с помощью гибридных ЭВ, однако для этого необходимо построить общую универсальную концепцию эволюционных вычислений.

Основные положения концепции эволюционных вычислений.

Положение 1. Моделирование эволюции популяции индивидуальных структур происходит посредством процессов циклического вычисления и оценки функции качества синтезируемых решений с последующей их селекцией и репродукцией. Поведение этих процессов определяется окружающей средой индивидуальных структур и зависит от их текущих характеристик.

Другими словами, модели ЭВ поддерживают популяции структур, которые эволюционируют в соответствии с правилами отбора и другими операторами поиска (рекомбинация, мутация). Каждому индивидууму популяции назначается значение его приспособленности (пригодности) к окружающей среде.

Воспроизводство фокусирует внимание на индивидуумах с более высокими значениями пригодности, используя информацию об индивидуумах. Рекомбинация и мутация влияют на индивидуумов, предоставляя тем самым базовую эвристику для исследования.

Положение 2. Несмотря на свою простоту, ЭВ обладают мощными когнитивными возможностями и адаптивными механизмами поиска.

Кроме того, поскольку модели ЭВ инспирированы природными системами, то предлагаемой единая универсальная концепция включает и поддерживает следующие положения.

Положение 3. В любых природных системах процессы роста и снижения энтропии системы могут иметь различную скорость. Между ними возникает своеобразный баланс, который (в сумме) может склониться в сторону нарастания энтропии или в сторону ее снижения, хотя в целом согласно второму закону термодинамики энтропия растет неизбежно, из чего следует необратимость многих естественных процессов (система не может однозначно вернуться в предыдущее состояние). В информационных системах и моделях, инспирированных природными системами, все процессы характеризуются тенденцией к росту информации. Однако информацию нельзя отождествлять с энтропией: процесс роста энтропии необратим и относится к окружающей среде, а информация – к объекту или системе.

Положение 4. Баланс самоорганизации в природных системах может склоняться к снижению энтропии. Это может произойти под влиянием фундаментальных природных процессов в случае возникновения детерминированного алгоритма, состоящего из последовательности реакций системы на разнообразные условия внешней среды (в неживой природе также существуют замкнутые алгоритмы последовательных реакций). Таким образом, в природе могут спонтанно возникать замкнутые алгоритмы.

Положение 5. Рано или поздно спонтанно образовавшийся алгоритм последовательных природных процессов неизбежно прерывается – следствие предпосылки о неизбежном росте энтропии. Следовательно, эволюционировать может только комплекс из многих систем (популяций), которые содержат в себе процессы репродукции и подвержены изменчивости. Процессы репродукции и отбора нетрудно обобщить на любые самоорганизующиеся системы. Например, эти процессы автоматически действуют в социальных системах. Люди, машины, технологии, системы управления и т.д. всегда сравниваются и отбираются в этих системах. Невозможно найти хотя бы один факт, когда эволюционировали бы системы, которые не имеют этого алгоритма.

Положение 6. Изменчивость различных структур природных систем не одинакова. Имеются как практически неизменные элементы, так и элементы, которые постоянно меняются, например, в такт с изменениями окружающей среды. Иными словами, наследственная информация защищена от изменчивости в разной степени, в зависимости от ее ценности для выживания. Если в системе произошли изменения и они благоприятны или безразличны для нее, то они остаются в ней и с течением времени становятся все менее и менее доступными для последующих изменений. Это объясняет необратимость и направленность эволюции – большую вероятность усложнения, чем упрощения организмов, изменения в которых происходят одновременно с изменениями во внешней среде, причем в соответствующем направлении. Однако если условия окружающей среды не меняются, то для изменчивости нет причин. Природа нашла выход из этого затруднения, «перемешивая» некоторую часть наследственной информации при размножении организмов.

Сопоставительный анализ основных положений ЭВ и базовых моделей, инспирированных природными системами, позволяет построить следующую универсальную конфигурацию элементов, характеризующих *общую модель ЭВ* в виде, представленном на рис. 1.

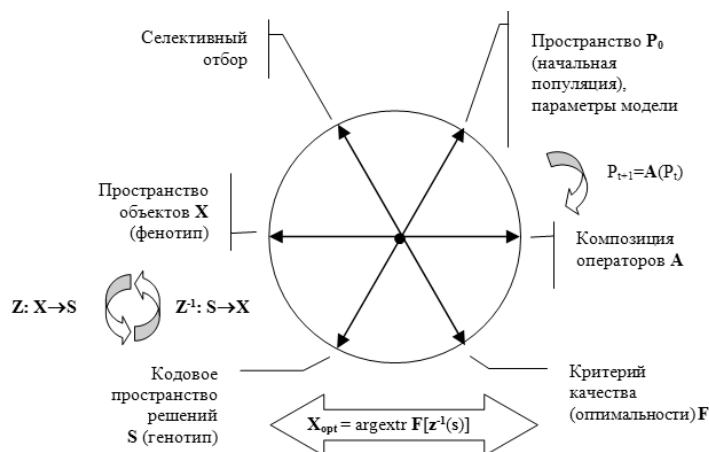


Рис. 1. Общая модель эволюционных вычислений

Рисунок (см. рис. 1) иллюстрирует положения единой концепции и основные элементы конфигурации универсальной модели эволюционных вычислений.

Суть единой универсальной концепции ЭВ сводится к следующему. Фиксируется множество объектов X (популяция решений), обладающих некоторыми параметрами и связанных друг с другом посредством определенной структуры. Среди этих объектов необходимо выбрать наилучшие в смысле некоторого критерия качества (оптимальности) F . Критерий оптимальности формируется на основе свойств объектов и не обязательно существует в виде аналитических выражений. Важно, что существует отображение

$$F: X \rightarrow R,$$

где R – множество действительных чисел и каждому объекту $x \in X$ из множества X сопоставляется значение критерия $F(x)$.

Фенотипическая природа исследуемого множества объектов произвольна, поэтому необходимо построить кодированное представление исходного множества объектов в другом, конечном множестве, обладающем структурой, например, векторного пространства S (генотип).

Отображение вида

$$\varphi: X \rightarrow S$$

описывает связь между исследуемыми объектами, которые выступают в качестве потенциальных решений задачи поиска и объектами, управление и манипулирование которыми осуществляет алгоритм ЭВ. Существует обратное отображение вида

$$\varphi^{-1}: S \rightarrow X$$

и каждому вновь сгенерированному элементу представления $s \in S$ соответствует элемент во множестве X .

Тогда, например, процесс оптимизации с помощью алгоритма ЭВ состоит в построении множества объектов-решений $X_{opt} \in X$, для которых выполняются следующие условия:

$$X_{opt} = \operatorname{argmax} F[\varphi^{-1}(s)], s \in S.$$

Таким образом, в процессе оптимизации множество X развивается и эволюционирует к оптимальному состоянию, изменяя свой состав и параметры входящих в него объектов. Способ построения множества объектов $s \in S$ определяется алгоритмом ЭВ.

Особенностью моделей ЭВ является то, что в качестве множества S строится так называемое кодовое пространство – множество представлений объектов x в виде кодов (хромосом). Эволюция множества X задается эволюцией представления S . На множестве S определяется подмножество P_0 – случайная начальная популяция. Решение на каждом шаге эволюции определяется следующей разностной вычислительной схемой:

$$P_{t+1} = A(P_t),$$

где A – композиция различных эволюционных операторов. Критерий оптимальности вычисляется на каждом шаге вместе с критерием отбора решений, реализуемым в композиции операторов A .

Другая идея, положенная в основу предлагаемой универсальной концепции ЭВ, инспирированных природными системами, относится к реализации системы эволюционного моделирования, оптимизации и структурного синтеза и применима к широкому кругу прикладных задач. Идея опирается на описанную выше общую

модель ЭВ, согласно которой алгоритмы ЭВ работают не в исходном множестве решений, а в его представлении в кодовом пространстве.

Наш замысел состоит в следующем. Универсальная концепция эволюционных вычислений предполагает, что оптимизируемая (синтезируемая) модель и эволюционный алгоритм *разделены*, а система эволюционных вычислений и моделирования представляет собой систему с обратной связью, как это показано на рис. 2.

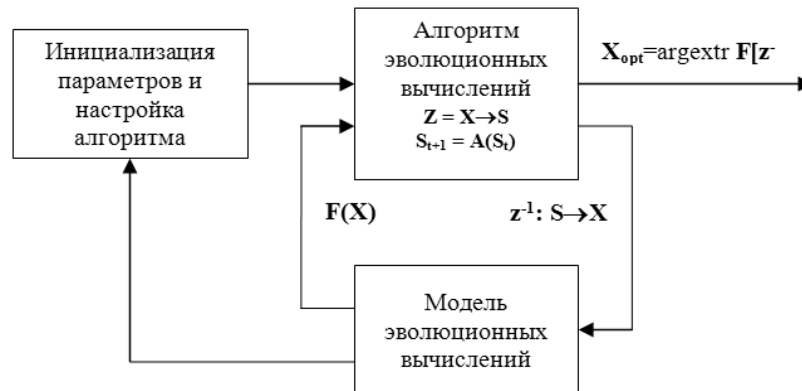


Рис. 2. Структура системы эволюционных вычислений

В данном случае математическая природа прикладной модели не имеет значения. Модель получает от алгоритма очередной набор значений параметров, характеризующих решения $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выдает соответствующее значение функции качества $F(X)$. Данное значение используется алгоритмом ЭВ при отборе и формировании новых решений. Процесс останавливается, когда текущий набор значений решений удовлетворяет заданному критерию, т.е. найдено оптимальное решение $X_{opt} = (x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{nopt})$.

Представленная на рисунке (см. рис. 2) структура системы эволюционных вычислений является адаптивной, так как в ней предусмотрена возможность системы модифицировать свое поведение для достижения лучших результатов. Эта возможность реализуется за счет того, что алгоритм ЭВ получает постоянную информацию о текущем состоянии модели, сравнивает текущее решение с желательным или оптимальным, ищет новые решения, инициируя их поиск.

Из общей модели ЭВ (см. рис. 1) и структуры системы ЭВ, показанной на рисунке (см. рис. 2), следует *общий принцип* – выявление состояния, принятие решения на изменение состояния и сама эволюция. Этот принцип составляет сущность любого саморазвивающегося механизма.

Логичность, непротиворечивость и универсальность предлагаемой концепции ЭВ позволяют приступить к разработке компьютерных вариантов и инструментария системы ЭВ.

Базовый цикл алгоритма эволюционных вычислений. Основным элементом системы ЭВ (см. рис. 2) является базовый цикл алгоритма ЭВ. На рис. 3 приводится графическое изображение базового цикла алгоритма ЭВ.

Из рисунка (см. рис. 3) видно, что базовый цикл включает следующую последовательность шагов: вычисление целевой функции, оценку качества решений, селективный отбор решений для репродукции и репродукцию, т.е. создание новых решений.

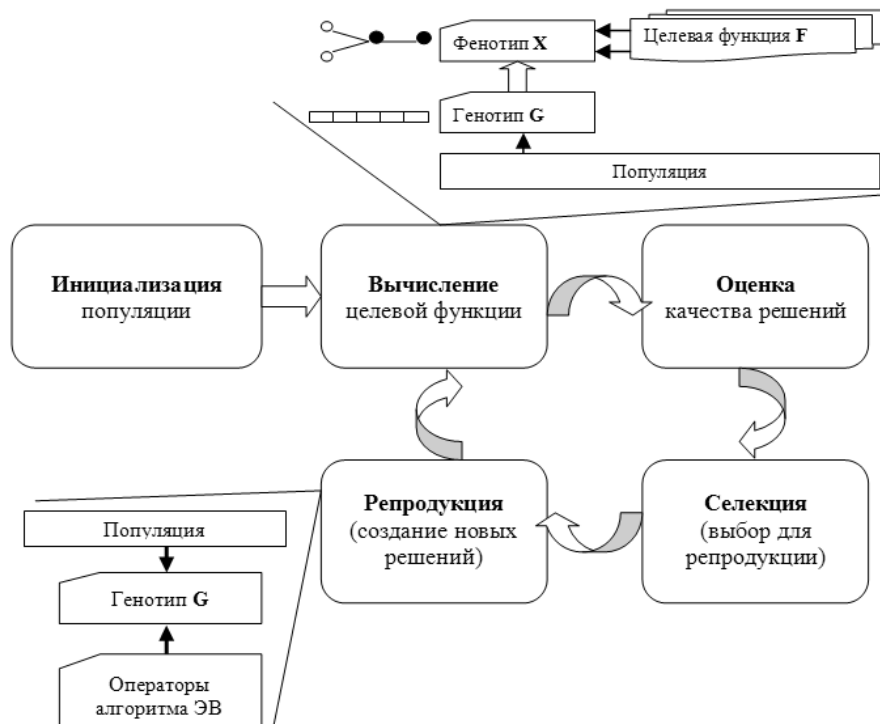


Рис. 3. Базовый цикл алгоритма эволюционных вычислений

Таким образом, базовый цикл соответствует основным положениям предлагаемой концепции ЭВ, инспирированных природными системами, и является неотъемлемым элементом структуры системы ЭВ.

При традиционных подходах не принято разделять модель как систему зависимостей, имитирующей структуру или функционирование исследуемого объекта, и алгоритм оптимизации или структурного синтеза модели. Структура предлагаемой системы ЭВ (см. рис. 2) представляет собой, по сути, автоматизированный объект управления, в котором устройство управления – алгоритм ЭВ, а объект управления – модель ЭВ. Сложность программирования существующих алгоритмов, инспирированных природными системами, состоит в том, что им приходится выполнять операции, для которых они не приспособлены, так как их предназначение – управление.

Другой недостаток традиционных подходов – это использование только одного алгоритма ЭВ, которого достаточно для проведения теоретических исследований, но бывает недостаточно при практическом применении.

Переход от традиционного программирования ЭВ к новой концепции ЭВ, инспирированных природными системами, осуществляется за счет усложнения модели ЭВ, которая может описывать сколь угодно сложную систему зависимостей и структур, основанных на природных аналогиях при сохранении основного требования к модели – адекватности исследуемому объекту. Модель не обязательно должна быть формальной (например, в виде логических, алгебраических, дифференциальных и т.п. уравнений); может эволюционировать во времени; цели моделируемого объекта и критерии настройки и управления ими также могут быть не формализованы и меняться во времени. Это вполне согласуется с основными положениями предлагаемой концепции – система ЭВ должна быть принципиально

открытой и процесс ее обучения никогда не завершается созданием окончательной формализованной модели.

При таком подходе система ЭВ должна получить свою собственную «информационную машину», действующую в непрерывном режиме усвоения и реструктуризации информации. Это открытая система с несчетным множеством потоков, каждый из которых может состоять из разнообразных структур. При этом сама модель ЭВ и ее сложность не фиксированы как и число реализуемых алгоритмов ЭВ.

Другое немаловажное достоинство предлагаемой концепции и ее отличительная особенность – программы, реализующие систему ЭВ, предлагается создавать так же, как производится автоматизация проектирования объектов и технологических процессов. Это означает, что вначале на основе анализа задачи проектирования, оптимизации, прогнозирования или управления выделяются исходные спецификации и множество взаимодействующих алгоритмов ЭВ. Затем строится модель ЭВ, которая формирует значения еще одной разновидности входных воздействий. Далее, эти воздействия по обратным связям передаются на алгоритмы ЭВ, а также на систему инициализации параметров и настройки алгоритмов ЭВ, в соответствии с общей структурой системы ЭВ (см. рис. 2). Более того, в структуре системы ЭВ можно отказаться от традиционной в теории управления обратной связи, если удастся адекватно представить ее работу с помощью экспертных знаний и правил работы с ними.

Ясная логика представленной концепции ЭВ, а также разделение алгоритма ЭВ и модели объекта оптимизации, прогнозирования или управления приведет к тому, что проектирование программы, описывающей ЭВ, а также формальный переход от алгоритма к реализующей его программе потребует минимальной отладки, т.е. увеличение времени на создание модели компенсируется сокращением времени на ее отладку.

Наконец, еще одним важным преимуществом предлагаемой универсальной концепции ЭВ являются широкие возможности, которые она предоставляет для организации распределенных ЭВ [3].

Заключение. Бифуркационный механизм играет важнейшую роль в общей эволюционной схеме природных процессов и систем. Именно он является источником роста разнообразия различных форм организации материи и непрерывно возрастающей сложности её организации. Кроме того, из-за вероятностного характера бифуркационного процесса, эволюция не может иметь обратного хода, точнее, вероятность обратного хода эволюции стремится к нулю, а это имеет отношение к другому фундаментальному факту – отсутствие обратимости не только эволюции, но и времени. В этом проявляется общая направленность эволюционного процесса, инспирированного природными системами. Возмущения, случайное взаимодействие и бифуркация – таковы ключевые элементы, которые определяют интерактивную динамику, отвечающую за эволюцию природных неравновесных систем [4].

Авторы считают, что предлагаемая концепция вполне подходит в качестве основы для разработки общей теории эволюционных вычислений, инспирированных природными системами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курейчик В.М., Родзин С.И. Эволюционные алгоритмы: генетическое программирование (обзор) // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2002, № 1. – С. 127-137.
2. Родзин С.И. Интеллектуальные системы. О некоторых алгоритмах, инспирированных природными системами: коллективная монография / Под ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2009. – С. 34-45.

3. *Родзин С.И.* Мягкие параллельные вычисления // Новости искусственного интеллекта. – 2005, № 4. – С. 53-58.
4. *Поликарпов В.С., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Поликарпова Е.В.* Философия искусственного интеллекта. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 240 с.

Курейчик Владимир Викторович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: vkur@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)383-451.

Кафедра систем автоматизированного проектирования.

Заведующий кафедрой; профессор.

Курейчик Виктор Михайлович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kur@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)393-260.

Заместитель руководителя по научной работе; профессор.

Родзин Сергей Иванович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: rodzin@mopevm.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)371-673.

Кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ, профессор.

Kureichik Vladimir Viktorovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: vkur@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)383-451.

The Department of Computer Aided Design.

Head the Department of Computer Aided Design, professor.

Kureychik Viktor Mihailovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kur@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)393-260.

Deputy head on scientific work, professor.

Rodzin Sergey Ivanovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: rodzin@mopevm.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)371-673.

Department of Software Engineering, professor.