

УДК 004.3:681.518

Д.Е. ИВАНОВ*Институт прикладной математики и механики НАН Украины, Донецк, Украина***МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ИДЕНТИФИЦИРУЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Рассматривается применение эволюционных вычислений в диагностике цифровых устройств. На основании разработанных моделей и методов предлагается единая методология построения новых эволюционных алгоритмов генерации идентифицирующих последовательностей цифровых устройств. Данная методология включает две основные составляющие: построение методов на основании шаблона эволюции решений и широкое применение параллельных вычислений при оценке потенциальных решений. В рамках данной методологии разработаны модели применения эволюционных алгоритмов к решению задач диагностирования. Для формализации оценочных функций введены понятия функций поведения, активности, различия поведения компонент по паре и по множеству устройств.

Ключевые слова: эволюционные вычисления, генетические алгоритмы, оценочная функция, диагностика, моделирование с неисправностями, параллельные вычисления.

Введение

Стремительный технологический прогресс позволяет проектировать всё более сложные цифровые устройства (ЦУ). Для обеспечения их надёжности требуется соответствующее развитие методов автоматизации проектирования ЦУ, их контроля и диагностики. Одним из направлений развития таких методов являются эволюционные вычисления [1]. В настоящее время исследователями разработан ряд методов построения идентифицирующих последовательностей (ИдП) ЦУ, использующих в качестве поисковых процедур эволюционные алгоритмы (ЭА) [2]. В отличие от структурных методов, предполагающих синтез решения, эти методы используют технику вероятностного построения потенциальных решений и их дальнейшую оценку, в частности на основе моделирования, что позволяет обрабатывать большие ЦУ. Однако построение таких методов основано на эвристическом, что затрудняет их эффективное применение к решению новых задач.

В данной статье на основе опыта авторов разработки ЭА построения ИдП ЦУ предлагается единая методология построения таких методов. Она базируется на двух основных положениях.

Первое говорит о конструктивном синтезе методов и заключается в том, что в ЭА методах выделяется шаблон метода и зависящие от реализации компоненты.

К последним относятся: вид оценочной функции, применяемые эволюционные операции, эвристики, параметры эволюции и т.д. Тогда ЭА строит-

ся как совместное задание шаблона метода и зависящих от реализации компонент. Второе положение заключается в широком применении параллельных вычислений. Распараллеливанию подвергаются как сам метод, так и применяемые в нём процедуры оценки особей и неисправного моделирования. Набор подходов распараллеливания позволяет проводить адаптацию ЭА для работы на параллельных вычислительных системах (ПВС).

Данная статья имеет следующую структуру. В разделе 2 предложены две модели применения ЭА и вводится понятие шаблона метода. В разделе 3 введены функции поведения ЦУ на структурном уровне. Раздел 4 показывает направления в построении параллельных версий ЭА.

1. Модели применения ЭА и их шаблоны

При решении задач построения ИдП выделяются две модели применения эволюционного поиска решений. В одноуровневой модели (схеме применения) ЭА-методов (рис. 1) единственный цикл эволюции формирует метод решения задачи. К методам данного класса относятся такие, в которых решение ищется за один вызов ЭА. В том случае, если сложность задачи не позволяет методу найти решение за один вызов ЭА поиска, то говорят о двухуровневой модели (двухуровневой схеме, рис. 2). В первой фазе происходит поиск промежуточной (локальной) цели. Если такая цель найдена, то вызывается ЭА поиска решения для данной локальной цели, формирующий вторую фазу итерации.

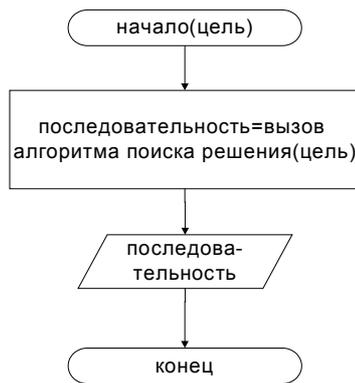


Рис. 1. Одноуровневая модель применения ЭА

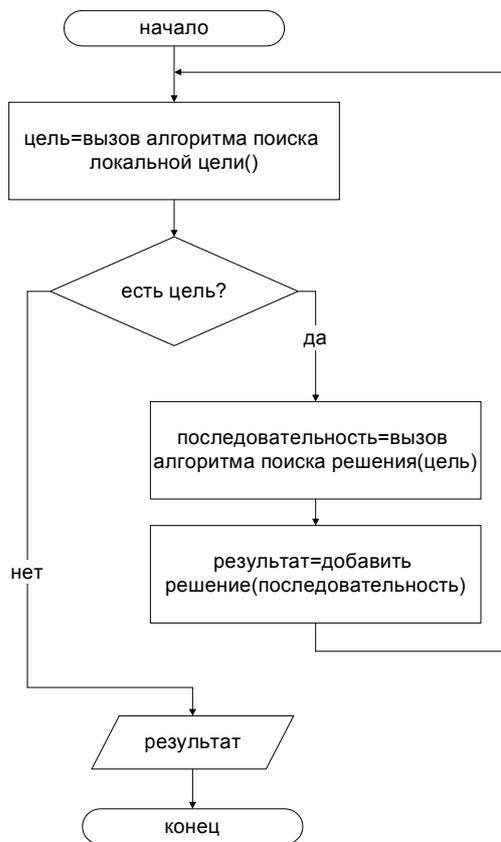


Рис. 2. Двухуровневая модель применения ЭА

Будем называть фазу 1 верхним уровнем, а фазу 2 – нижним уровнем ЭА. При этом структура фазы 2 метода соответствует одноуровневому ЭА построения ИдП.

В задачах построения входных ИдП решение (последовательность) часто строится по аддитивному принципу, т.е. данные задачи естественным образом проецируются на двухуровневую схему ЭА.

Рассматриваемые модели не указывают какой конкретно ЭА будет производить поиск решения. Поэтому они применимы как к популяционным эволюционным методам (генетический алгоритм, ГА), так и к методам с эволюцией одного решения (метод симуляции отжига, СО).

В предлагаемой методологии ЭА рассматривается состоящим из некоторых компонентов. Среди них выделяется базовая часть, которая показывает эволюцию решений и называется шаблоном, и компоненты, которые зависят от реализации. К ним относят оценочную функцию, эволюционные операции, параметры эволюции т.п. Для таких компонент их вид или численные значения обосновываются на этапе реализации метода на основании машинных экспериментов. Совместное задание шаблона метода и зависящих от реализации компонент говорит о построении соответствующего ЭА-метода. Для примера покажем шаблон одноуровневого ГА построения ИдП.

Шаблон А1

```

ГА_построения_ИдП ( A0 , Параметры ) {
    ПредварительнаяОбработка ( A0 ) ;
    Pop0 = ПостроениеНачПопуляции ( ) ;
    ОценитьПопуляцию ( Pop0 , A0 , Nит ) ;
    НомерПопуляции=0;
    while ( ИдетЭволюция ( ) ) {
        ВычислитьФитнесс ( Pop0 , Nит ) ;
        while ( СтроитсяНоваяПопуляция ( ) ) {
            Родители=Селекция ( Pop0 ) ;
            Потомки=Скрещивания ( Родители ) ;
            Потомки=Мутации ( Потомки ) ;
            ДобавитьВНовуюПопуляцию ( Потомки ) ;
        }
        ОценитьПопуляцию ( Pop0 , A0 , Nит ) ;
        НомерПопуляции++;
    } // конец while – конец эволюции
    СортироватьПопуляцию ( Pop0 ) ;
    Решение=ТекущаяПопуляция [ 0 ] ;
    // лучшая особь в посл. популяции
} // конец одноуровневого ГА
    
```

Данный шаблон показывает итеративное построение новых популяций особей-последовательностей с выбранными: представлением особей, эволюционными операциями, оценочной функцией, параметрами эволюции. В данном шаблоне зависящие от реализации компоненты только названы.

Аналогичным образом строятся шаблоны двухуровневых ЭА. В таких методах важным является объект *Цель* (рис. 2). Например, в задачах тестирования он представляет неисправность, для которой на нижнем уровне с помощью ЭА строится тест. В других задачах он может представлять некоторое множество (неисправностей, подпоследовательностей и т.п.). Различные стратегии выбора *Целей* и их достижения с помощью ЭА на нижнем уровне порождают классы методов на основе заданных шаблонов.

В одно- и двухуровневых ЭА диагностирования решения могут представлять как входную последовательность (задачи построения ИдП), так и множества (задачи выбора субоптимальных множеств тестов, неисправностей и т.д.). Для выбранного представления решения разрабатываются проблемно-ориентированные эволюционные операции.

2. Формализация оценочных функций

При построении ЭА одно из центральных мест занимает оценочная функция. Её вид и скорость вы-

числения существенно определяют эффективность метода. В ЭА построения ИдП вычисление оценок особой осуществляется на основании моделирования поведения ЦУ на заданной последовательности. Существенным является применение структурной информации о поведении ЦУ, что даёт преимущество в сравнении с абстрактными методами, рассматриваемыми устройством в виде чёрного ящика.

В задачах построения ИдП параметры оценочных функций делятся на статические, зависящие только от ЦУ (число входов, выходов, элементов состояний и т.д.), и динамические (табл. 1), вычисляемые по результатам моделирования ЦУ.

Таблица 1

Динамические параметры оценочных функций

Параметр	Интерпретация
$U_N_{\text{ВЫХ}}, U_N_{\text{ВХ}}, U_N_{\text{ТР}}, U_N_{\text{ЭЛ}}$	Число компонент, для которых установлено заданное значение
$R_N_{\text{ВЫХ}}, R_N_{\text{ВХ}}, R_N_{\text{ТР}}, R_N_{\text{ЭЛ}}$	Число соответствующих компонент с различными значениями
$N_{\text{СОБ}}$	Число событий
L	Длина последовательности
$ F_{\text{ТЕСТ}} , F_{\text{АКТ}} $	Число обнаруженных, активизированных неисправностей

Для формализации структурной информации о поведении ЦУ вводятся понятия булевых функций установки компонент в заданное значение в алфавите моделирования и функции различия. Пусть функция $g(X_j, A_0)$ показывает значение на выходе компоненты g в заданном алфавите после моделирования на наборе X_j .

Определение 1. Функция установки в заданное значение $U^{(v)}(g, X_j, A_0)$ равна 1, если после моделирования A_0 на входном наборе X_j выход элемента g равен v .

При выборе в качестве базового трёхзначного алфавита E_3 целевыми будут значения 0 и 1, снимающие неопределённость начального состояния и, соответственно, используются функции $U^{(0)}$ и $U^{(1)}$.

Через данные функции выражаются оценки особой в методах инициализации ЦУ и достижения состояний ЦУ. Например, в методе построения последовательности достижения заданного состояния в ЦУ оценка прямо показывает число элементов состояний, для которых достигнуто необходимое значение.

Определение 2. Функция различия $r(g, X_j, A_1, A_2)$ принимает значение 1 тогда и только тогда, когда после моделирования элемента g на наборе X_j его выходы в устройствах A_1 и A_2 различны.

Для применения с трёхзначными логиками данная функция расширяется соответствующим образом. Семантика такого различия берётся из определения эквивалентности в трёхзначной логике.

Данные функции различия применяются в методах, где происходит сравнение поведения двух ЦУ. К ним относятся, в частности, методы верификации поведения и построения проверяющих тестов.

В методе построения диагностических тестов [2] последовательность должна разбивать целевой класс неразличимых неисправностей на меньшие. В этом случае функция различия $r()$ определяется для множества ЦУ и принимает значение 1, если значение выхода компоненты хотя бы одного устройства отлично от других в заданном множестве.

Оценка особи во всех методах, основанных на сравнении поведения ЦУ, имеет вид взвешенного суммарного различия по множествам выходов элементов, выходов элементов состояний и внешних выходов. Показывается, что все динамические параметры оценочных функций (табл. 1) выражаются через введённые функции установки и разности значений.

Отметим, что хотя рассматриваемый подход формализации поведения ЦУ предложен для разработки ЭА генерации ИдП, он может применяться и в других подходах построения таких последовательностей.

3. Построение параллельных версий ЭА

В ЭА построения входных ИдП основным моментом является то, что для оценки качества генерируемых решений выполняется моделирование работы ЦУ на заданной последовательности-особи (исправное либо с неисправностями), что делает такие методы достаточно медленными. Для преодоления этого недостатка разрабатываются параллельные ЭА. Наиболее просто данная задача решается для ГА, поскольку они обладают врожденным параллелизмом. Выделим следующие подходы адаптации ЭА для работы на ПВС: а) построение параллельных ГА (ПГА) без изменения структуры алгоритма, но с организацией параллельного вычисления в процедуре оценки популяции: схема «хозяин-рабочий»; б) построение ПГА с изменением его глобальной структуры: схема «островов»; в) построение параллельных процедур моделирования с неисправностями внутри ЭА.

Разрабатываемые методы должны проектироваться на доступные разработчикам ПВС, исходя из чего выделяются три основных класса таких систем:

- слабопараллельные с общей памятью: рабочие станции, содержащие 2-4 вычислительных ядра;
- сильнопараллельные с общей памятью: содержат 8-12 вычислительных ядер;
- вычислительный кластер: независимые рабочие станции с локальной оперативной памятью.

Схема «хозяин-рабочий» предполагает, что в параллельной версии алгоритма существует один основной цикл ГА построения популяции, который соответствует процессору-«хозяину», а остальные называются «рабочими» и реализуют процедуры вычисления оценочных функций.

Выделяются три подхода построения ПГА для многоядерных ВС с общей памятью [3]. Первый подход заключается в параллельном моделировании поведения нескольких ЦУ внутри процедуры оценки одной особи (рис. 3). Такая ситуация, в частности, возникает в методах, где для оценки заданной последовательности-особи необходимо выполнить моделирование поведения двух ЦУ. Второй подход является более общим и заключается в параллельном вычислении оценок нескольких особей в одной популяции (рис. 4). Третий подход является комбинацией первых двух и заключается в том, что при параллельном вычислении оценок особей в одной популяции внутри каждой процедуры оценки особи также есть параллельные процедуры моделирования ЦУ. Для диаграммы на рис. 4 внутри каждой процедуры вычисления оценки будет выполняться два вычислительных потока. Данные методы распараллеливания реализованы программно и исследованы их характеристики в зависимости от типа инстру-

ментальной ВС. Средние по набору схем ISCAS-89 [4] параметры ускорения S , эффективности загрузки ядер E и доли последовательного кода f приведены в табл. 2. Отметим, что для системы с 12-ю вычислительными ядрами максимальное ускорение составило 13,05, что больше числа вычислительных ядер. Для этой же ВС наилучшие средние характеристики достигаются при числе потоков 80, что также существенно больше числа вычислительных ядер.

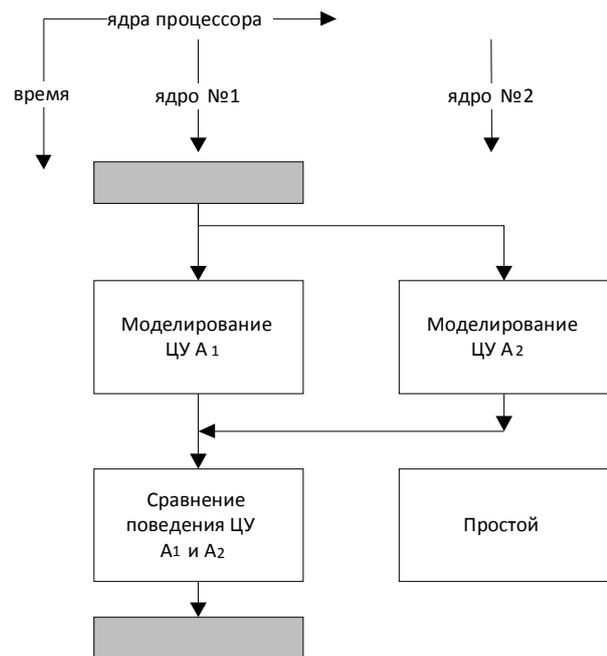


Рис. 3. Верификация эквивалентности двух ЦУ

Таблица 2
Характеристики параллелизации
схемы «хозяин-рабочий»

Система, число ядер, подход	S	E	F
Слабопараллельная, 2, 1	1,88	0,94	0,06
Слабопараллельная, 4, 2	2,04	0,51	0,51
Слабопараллельная, 4, 3	2,05	0,51	0,46
Сильнопараллельная, 12, 2	8,09	0,67	0,04

В схеме «островов» происходит эволюция нескольких популяций решений, которые обмениваются лучшими из них. Для такой схемы ПГА выделяются компоненты сервера и клиентов [5]. При этом сервер выполняет организационные функции, а на каждом из островов выполняется эволюционный поиск решения. Для схемы «островов» разрабатываются методы работы сервера и клиентов. Топология взаимодействия клиентов задаётся матрицами смежности. Разработанный подход позволяет реализовывать различные топологии безтупикового взаимодействия компонент и схемы адаптации параметров ГА по островам, а также проектировать такие методы на ПВС различных классов.

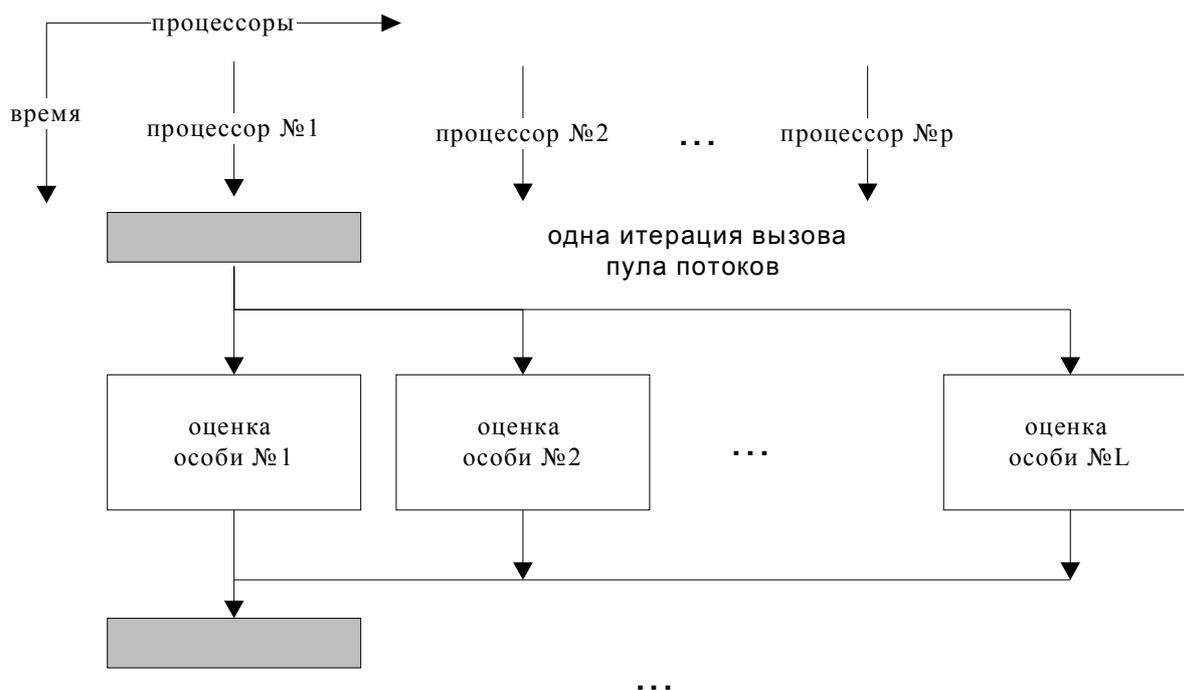


Рис. 4. Вычисление оценок особей в популяции

В ЭА построения ИдП также широко применяется моделирование с неисправностями. Обычно оно выполняется при псевдослучайной генерации начальных решений, либо при дополнительной проверке качества найденных решений.

Основной выбрана схема распараллеливания с разбиением списка неисправностей, обладающая хорошей масштабируемостью [6]. В данном подходе полный список моделируемых неисправностей разбивается на подспски пропорционально числу процессоров, после чего выполняется их раздельное моделирование. Подход адаптирован для вычислительного кластера и слабопараллельной ВС с общей памятью. Наилучшие числовые результаты показывает реализация для ВС раздельной памятью. На кластере с 8 процессорами для больших схем каталога ISCAS-89 ускорение составило 4,38-6,98 раза. Для ВС с общей памятью и числом ядер равным 4 ускорение составило 2,81-3,44 раза. К сожалению, при росте числа ядер до 12 ускорение практически не росло. Для такой ВС разработан принципиально новый метод моделирования ЦУ с неисправностями [2]. Он заключается в том, что для каждого входного набора выполняется параллельное моделирование групп неисправностей. При этом от набора к набору группы формируются динамически. Для реализации метода для ВС с 12 вычислительными ядрами ускорение составило 4,61-6,72 раза.

Отметим, что применение параллельных методов неисправного моделирования в ЭА построения ИдП означает их адаптацию на соответствующую параллельную ВС. В отличие от методов построения

ПГА такая адаптация возможна для непопуляционных ЭА, например СО.

Заключение

В статье рассмотрена методология построения эволюционных методов диагностики и идентификации цифровых устройств. Она заключается в синтезе методов на основании шаблона путём конструктивного задания зависящих от реализации компонент. Введены модели применения ЭА в задачах диагностики и шаблоны таких моделей. Предложены функции, формализующие поведение ЦУ на структурном уровне. Рассмотрены направления построения параллельных версий данного типа методов. Совокупность предложенных подходов позволяет проводить структурный синтез новых эффективных ЭА построения идентифицирующих последовательностей и их оптимизации для параллельных ВС различных классов.

Литература

1. Скобцов, Ю.А. Основы эволюционных вычислений [Текст] / Ю.А. Скобцов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
2. Иванов, Д.Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих последовательностей цифровых устройств [Текст] / Д.Е. Иванов. – Донецк, 2012. – 240 с.
3. Иванов, Д.Е. Подходы к построению параллельных генетических алгоритмов идентификации цифровых схем для многоядерных систем [Текст] /

Д.Е. Иванов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2011. – №1 (172). – С. 111 – 117.

4. Brgles, F. *Combinational profiles of sequential benchmark circuits* [Текст] / F. Brgles, D. Bryan, K. Kozminski // *International symposium of circuits and systems, ISCAS-89*. – 1989. – P. 1929 – 1934.

5. Иванов, Д.Е. *Взаимодействие компонент в распределённых генетических алгоритмах генера-*

ции тестов [Текст] / Д.Е. Иванов, П.А. Чебанов // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Обчислювальна техніка та автоматизація"*. Вип. 16(147). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 121 – 127.

6. Иванов, Д.Е. *Методы параллельного моделирования СБИС с неисправностями* [Текст] / Д.Е. Иванов // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 5 (59). – С. 114 – 119.

Поступила в редакцію 15.02.2013, рассмотрена на редколлегии 20.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры АСУ Ю.А. Скобцов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина.

МЕТОДОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ ІДЕНТИФІКУЮЧИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

Д.Є. Иванов

Розглядається застосування еволюційних обчислень в діагностиці та проектуванні цифрових пристроїв. На підставі розроблених моделей і методів пропонується єдина методологія побудови нових еволюційних алгоритмів генерації ідентифікуючих послідовностей цифрових пристроїв. Дана методологія включає дві основні складові: побудова методів на основі шаблону еволюції рішень та широке застосування паралельних обчислень при оцінці потенціальних рішень. У рамках даної методології розроблено моделі застосування еволюційних алгоритмів до рішення задач діагностування. Для формалізації оцінюючих функцій введено поняття функцій поведінки і активності компонент пристрою, відмінності поведінки компонент за парою та множиною пристроїв.

Ключові слова: еволюційні обчислення, генетичні алгоритми, оціночна функція, діагностика, моделювання з несправностями, паралельні обчислення.

METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS OF CONSTRUCTION OF IDENTIFYING SEQUENCES OF DIGITAL DEVICES

D.E. Ivanov

The application of evolutionary computation in the diagnosis and the design of digital devices are considered. Based on the developed models and methods the unified methodology for the construction of new evolutionary algorithms for generation of identification sequences is proposed. The methodology consists of two main components: the construction of such methods basing on the template of evolution and on the use of parallel computation for the evaluation of potential solution. As part of this methodology, a model of application of evolutionary algorithms to solve problems of diagnosis is developed. To formalize the evaluation functions the concept of the functions of behavior and differences of component of the devices on the pair and for a set of devices are introduced.

Key words: evolutionary computation, genetic algorithms, evaluation function, diagnostics, fault simulation, parallel computing.

Иванов Дмитрий Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела теории управляющих систем Института прикладной математики и механики НАН Украины, Донецк, Украина.