

А.Е. Дорошенко, Р.С. Шевченко

СИСТЕМА СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Описана система символьных вычислений, предназначенная для встраивания в промышленные приложения с целью обеспечения их гибкости и настраиваемости соответственно изменяющимся требованиям и условиям функционирования. Предложен метод погружения настраиваемых программных систем в промышленные комплексы, основанный на использовании декларативных средств программирования при описании взаимодействий программных компонент со своим окружением. Метод позволяет значительно уменьшить стоимость разработки сложного программного обеспечения, а также решать задачи анализа и обеспечения надежности программного кода.

Введение

Системы символьных вычислений имеют богатую историю и применяются для различных целей с первых лет существования компьютерной науки как самостоятельной области. Одним из направлений в разработке систем символьных вычислений являются системы переписывающих правил (rewriting rules systems) [1]. На сегодня в мире существует более сотни систем переписывающих правил, которые поддерживаются как исследовательскими группами, так и коммерческими организациями и используются в различных областях приложений. В Кибернетическом центре НАН Украины имеются большие традиции построения таких систем: одной из первых была система "Аналитик" [2], широко известна также система алгебраического программирования АПС [3, 4]. В этой статье представлена еще одна система символьных вычислений, основанная на парадигме переписывания TermWare и предназначенная для решения задач программной инженерии.

Существует некоторая типология систем переписывания, отражающая как эволюцию программного обеспечения (ПО), так и области применения. Традиционной сферой применения является обработка строк, в качестве примера можно привести Рефал [5]. Здесь фундаментальной математической моделью являются алгорифмы Маркова, а вычисления — это последовательное применение правил к началь-

ной цепочке строк. Подобное ПО встроено в почти каждую существующую систему морфологического анализа. С развитием программной инженерии появилась потребность автоматического анализа и преобразования программ, где объектами преобразований являются синтаксические деревья конструкций языка программирования. Спектр применения таких систем — от автоматического генерирования документации до систем анализа ПО и автоматического перевода программ с одного языка программирования на другой. Автоматизация построения логических доказательств это одно из наиболее естественных применений символьных вычислений. Здесь в основе математической модели лежит логическая редукция: шаг вычислений соответствуют шагу логического вывода в некоторой системе аксиом в соответствии с определенными правилами вывода. Известными формальными моделями в этом направлении являются комбинаторная логика [6] и π -исчисление [7]. На этой основе построен целый класс языков программирования и разработаны классы промышленных применений, в частности системы проектирования логических микросхем, высокоуровневые языки программирования, экспертные системы.

Особый класс составляют универсальные системы переписывающих правил, который появился в последние годы как альтернатива систем логического программирования. Характерной его особенностью является наличие

правил представления либо преобразования объектов предметной области произвольной структуры в виде алгебраических термов, а также стратегий применения правил вывода, основанных на внелогических принципах, часто в виде императивного алгоритма последовательности поиска и применений правил.

TermWare принадлежит к последнему типу систем наряду с APS [3], Maude [8] и Stratego [9]. В данной статье описывается синтаксис и семантика языка, демонстрируется применение системы к задачам программирования динамических приложений, характеризующихся, с одной стороны, высокой степенью взаимодействий со средой, а с другой — высокой изменчивостью требований и необходимостью перепрограммирования таких систем.

1. Назначение и особенности системы TermWare

Система TermWare нацелена на разработку высокодинамичных прикладных систем, к которым предъявляются повышенные требования как к встроенному интеллекту для обеспечения интерактивности разрабатываемых систем, так и к удешевлению разработки, сокращению сроков проектирования и улучшения характеристик повторного их использования (реинжиниринга) и сопровождаемости. Она отличается от большинства других систем этого класса как назначением и семантикой используемых средств, так и технологией их реализации. Язык TermWare не является универсальным языком программирования в том смысле, что он не предназначен для написания полнофункциональных программных систем. Это координационный язык-оболочка [10], предназначенный для написания предметно-ориентированных частей приложений, встраиваемых в прикладную систему для реализации функций взаимодействия этой системы с программным окружением.

Существенны также семантические особенности языка TermWare, от-

личающие его от других разработок в данной области. Традиционное декларативное программирование с помощью парадигмы переписывания основано на таком образце применения для написания программной системы, при котором строится формальная модель предметной области, в рамках этой формальной модели описываются основные понятия и структуры данных предметной области, переписывающие правила применяются для реализации классического алгоритма, преобразующего вход в выход, и операции ввода/вывода и взаимодействия с другими программами не представлены в декларативном описании в явном виде, а представляют собой побочные эффекты. Такой устоявшийся подход малоприменим в индустрии программирования по следующим причинам.

Во-первых, построение полного формального определения предметной области часто представляет собой слишком трудоемкий процесс для практического применения. Как правило, предметная область включает в себя много уже построенных элементов окружения, например реляционные базы данных (БД), объектные модели, протоколы межпрограммного взаимодействия. Для того чтобы использовать декларативное программирование, нужно представить все эти компоненты в одной формальной модели, придавая формальную семантику уже построенным императивным моделям. Это делает процесс построения формальной модели слишком сложным и дорогостоящим. Во-вторых, современные программные комплексы не могут быть прямо описаны как алгоритмы в классическом смысле, т.е. как преобразователи входной информации в выходную. Очень часто программная система представляет собой некоторое поведение, включающее в себя взаимодействие с внешней средой. И в-третьих, операции ввода/вывода, обычно представленные в декларативном программировании как побочные эффекты, имеют слишком большое значение чтобы быть проигнорирован-

ными в формальной модели вычислений. Отсутствие ввода/вывода в модели означает невозможность анализировать и преобразовывать механизмы взаимодействия программ с окружением, что делает традиционные системы логического программирования мало мощными и непригодными для важных классов приложений.

В TermWare предложен новый формализм для декларативного описания предметной области программирования распределенных программных комплексов — термальные системы. Он включает в себя описание в виде термов как функциональности частей программных комплексов, подобно традиционным системам, так и их взаимодействия со внешней средой. Последнее представляет собой динамическую базу фактов во внутренней логике системы, например состояние внешней среды в системе управления либо перечень текущих бизнес-процессов в системе управления потоками работ. Таким образом, вместо сокрытия императивного стиля программирования в побочных эффектах в TermWare происходит погружение императивных операций в логику декларативной программы. Термальная система является открытой в том смысле, что она интерактивна и ее поведение определяется не только программным кодом, но и состоянием среды.

Технологические отличия TermWare связаны с тем, что в современной индустрии разработки ПО уже не рассматривается отдельно от таких элементов технологической платформы программного окружения, как базы данных, системы мониторинга транзакций и унаследованные библиотеки. Однако большинство существующих систем предоставляют свое окружение, подразумевая, что конечный пользователь работает в оболочке системы симульного программирования.

TermWare оформлена как библиотека языка Java, встраиваемая в программное приложение. Для разработчика система термов выглядит как совокупность экземпляров класса ITerm-

System, с возможностью управления набором правил и редуцирования термов. База знаний также может содержать императивные элементы, описанные как Java-классы. Таким образом, имеется возможность использовать декларативную модель программирования в программных комплексах, основанных на Java-платформе в тех случаях, когда это необходимо. Разработчик может использовать термальную систему как программный агент, встраиваемый в общую инфраструктуру программной системы.

Встраивание систем обработки правил в Java-платформу в последнее время быстро развивается и даже стандартизируется. Существует предложение к стандарту языка Java (jsr94 [11]) и несколько систем, встраиваемых в Java по тому же принципу, что и TermWare. Среди них можно выделить Jess [12] (порт CLISP) и ASDF [12], представляющие собой системы переписывающих правил, предназначенные для построения экспертных систем и преобразований деревьев синтаксического разбора соответственно. Поэтому разработка TermWare своевременна и необходима.

2. Формальная модель

Формальная модель TermWare построена как обычная алгебра термов, где объектами языка являются термы, т.е. выражения вида $f(x_1, \dots, x_n)$, переменные и элементарные типы данных, подобно другим языкам функционального программирования. Единственное отличие от стандартного подхода состоит в том, что конструктор упорядоченного множества является выделенным термом и операции подстановки на этих термах сохраняют порядок. Вычисления определяются наборами переписывающих правил вместе со стратегией применений по такой же схеме, как и в APS [3] или Stratego[9].

Основное отличие TermWare от языков алгебраического программирования (таких, как OBJ и Maude [8]) состоит в том, что модель вычислений в TermWare определяется в терминах

поведения программ, т.е. входных воздействий и реакций, а не в терминах входа и выхода, как это происходит при традиционном подходе. Иными словами, в традиционных системах переписывающих правил вычисления являются преобразованиями входного термина в некоторую каноническую форму с помощью набора переписывающихся правил. Тем самым язык определяет функциональные зависимости вида $f(x) = y$, где x — вход алгоритма; y — выход в терминах классической теории алгоритмов. В TermWare набор переписывающих правил определяет не вычисления целиком, а один шаг вычислений, в терминах теории динамических систем [14] — вида $f(x, s) \rightarrow (s', y)$, где x — входной сигнал; y — выходной, s — внутреннее состояние.

В этом разделе представлена относительно простая синтаксическая формальная модель и показано, как на ее основе можно организовать работу с более общими структурами.

Считаем, что алфавит языка включает (везде, если это не оговорено особо, нижние индексы принадлежат перечисляемому множеству):

- множество констант c_i , принадлежащих одному из примитивных типов (INT, BOOL, STRING, ATOM); с каждой константой связано значение на множестве соответствующего примитивного типа;
- INT — множество целых чисел, представляемое константами 1, 2, ...;
- BOOL — множество булевых значений, представляемое константами **true** и **false**;
- STRING — множество строк в алфавите Unicode;
- ATOM — множество атомарных неинтерпретируемых значений; среди атомов выделим NIL, играющий специальную роль.

Кроме того, язык включает также множество терминальных символов t_1, \dots, t_N , множество пропозициональных переменных x_i , скобки '(' и ')' и знак зяпятой ',' множество функциональных символов f_i , символ среды S , множество

φ модельных символов операций чтения информации из среды, а также множество δ модельных символов воздействия на среду.

Термы языка строятся по следующей схеме. Сначала определяется множество конкретных термов T_c :

- $c_i \in T_c$;
- если $x_1 \in T_c, \dots, x_N \in T_c$, то и f есть функциональный символ, $f(x_1, \dots, x_N) \in T_c$,

а также множество подстановочных термов T_v :

- $x \in T_c \Rightarrow x \in T_v$;
- $x_i \in T_v$;
- $x_1 \in T_v, \dots, x_N \in T_v \Rightarrow f(x_1, \dots, x_N) \in T_v$.

Терм, принадлежащий разности множеств $T_v \setminus T_c$, назовем термом со свободными переменными, а для каждого термина t множество входящих в него нетерминальных символов — множеством свободных переменных этого термина и обозначим $\nu(t)$.

Далее на системе термов определим следующие синтаксические функции и их свойства:

- функция *typename*: $T_v \rightarrow \text{STRING}$ возвращает синтаксический тип термина; это может быть:
 - наименование одного из типов "BOOL", "INT", "ATOM" или "STRING" для примитивных термов;
 - "x" для пропозициональных переменных;
 - "T" для сложных термов;
- функция *name*: $T_v \rightarrow \text{STRING}$ возвращает имя головного символа термина;
- функция *arity*: $T_v \rightarrow \text{STRING}$ возвращает арность символа термина;
- функция *subterm*: $T_v \times \text{INT} \rightarrow T_v$ вычисляет индекс подтерма начиная с нуля:
 - если $t \in T_v, i < \text{arity}(t)$, то *subterm*(t) возвращает i -й субтерм t ;
 - если $i > \text{arity}(t)$, то *subterm*(t) = NIL;
- функция *equal*: $T_v \times T_v \rightarrow \text{BOOL}$ возвращает истинное значение в случае тождественного совпадения $x = y$;

• функция $less: T_v \times T_v \rightarrow \text{BOOL}$ определяется такими случаями:

- если $x \neq \text{NIL}$, то $less(\text{NIL}, x)$;
- если $typename0(x) < typename0(y)$, то $less(\text{NIL}, x)$;
- если x, y — константы, то $less(x, y)$ представляет собой естественное упорядочение;
- если x, y — атомы, то $less(x, y)$ представляет собой лексикографическое упорядочение их имен;
- если x, y — пропозициональные переменные, то имеет место $\neg less(x, y) \wedge \neg less(y, x)$;
- если x, y — составные термы и $arity(x) < arity(y)$, то $less(x, y) = \text{true}$;
- если x, y — составные термы и $arity(x) = arity(y) \wedge less(name(x), name(y))$, то $less(x, y) = \text{true}$;
- если x, y — составные термы и $arity(x) = arity(y) \wedge name(x) = name(y)$, то $less(x, y)$ представляет собой лексикографический порядок кортежей элементов.

Таким образом, множество термов (с точностью до перенумерации пропозициональных символов) является полностью упорядоченным. Это позволяет выделить конструктор упорядоченного множества $set(x_1, \dots, x_N)$, т. е. терм, обозначающий упорядоченное множество из N элементов. Отсюда можно полагать, что если $t = set(x_1, \dots, x_N)$, $subterm(i, t) = x$, $subterm(j, t) = y$, $0 < i < j < arity(t)$, то $less(x, y)$.

Теперь $\nu(t)$ можно определить уже на синтаксическом уровне: $\nu(c_i) = \text{NIL}$, $\nu(x_i) = \{x_i\}$, $\nu(f(t_1, \dots, t_N)) = \bigcup_{i=1}^N \nu(x_i)$.

Выражение $subst(t, x, s)$ есть подстановка s в t вместо свободной переменной x . Будем также употреблять для подстановки обозначение $t[x, s]$. Терм $bound\ unifi(t_1, t_2)$ означает операцию унификации t_1 и t_2 со множеством связанных пропозициональных переменных, входящих в t_1 и t_2 , $free\ unifi(t_1, t_2)$ — операцию унификации t_1 и t_2 , при которой свободные переменные t_1 и t_2

предварительно переименовываются таким образом, чтобы $\nu(t_1) \cap \nu(t_2) = \emptyset$.

Семантика правила переписывания без взаимодействия со средой определяется в виде $apply(t, x \rightarrow y) = subst(y, free_unifi(x, t))$, где $x \rightarrow y$ — правило переписывания терма x в y . Любую среду S можно представить как БД фактов, определив акты взаимодействия терма со средой с помощью функций $\varphi: S \times T_c \rightarrow T_c$ (получение информации из S) и $\delta: S \times T_c \rightarrow S$ (передача информации в S).

Наконец, определим основной объект нашего рассмотрения — термальную систему. Термальная система τ есть пара $\tau = (S, R)$, где S — модель среды, а R — набор переписывающих правил, представляющий взаимодействие со средой. Переписывающее правило из R — это терм с четырьмя аргументами вида $rule(x, in, y, out)$, которое для удобства обозначим $x[in] \rightarrow y[out]$. Такое выражение можно прочитать как "переписать x при условии in в y , применив к среде операцию out ". С использованием введенных выше обозначений схему выполнения правила переписывания можно записать в виде

$$apply((S, t), x[\varphi] \rightarrow y[\delta]) = (\delta S, free_unifi(z, out)), z,$$

где $z = subst(y, free_unifi(x, t, \varphi(S, in)))$.

Наконец, последний шаг — добавим в модель понятие имени системы и множества систем. Имя системы — это атом либо специальный терм $_name(x_1, \dots, x_n)$, где x_1, \dots, x_n — атомы. Считаем, что интерпретация терма $_name(x_1, \dots, x_n)$ определяется функцией именованная $\phi: T_c \rightarrow \Phi$, которая возвращает определение термальной системы в некотором (иерархическом) пространстве имен Φ . Саму терминальную систему можно определить как терм вида $System(name, ruleset, facts, strategy)$, где $name$ — имя системы; $ruleset$ — множество правил переписывания со взаимодействием; $facts$ — база данных фактов среды; $strategy$ — стратегия

применения переписывающих правил, определяющая последовательность применения правил. Функция редуцирования терма в системе выражается в виде терма $reduce(s, t)$, где t — терм, редуцируемый в системе с именем s .

Таким образом, TermWare — это непосредственное отображение логической модели взаимодействий в язык программирования, обладающее аналогами современных средств поддержки наследования и иерархической системы имен. Ниже покажем, что такие системы более естественно отражают типичные проблемы программирования на уровне архитектуры и пригодны для описания не только вычислительных алгоритмов, но и поведения программных комплексов, состоящих из нескольких взаимодействующих подсистем.

3. Реализация языка

Формальная модель, изложенная выше, отображается в языке программирования с помощью следующих средств и соглашений.

Терминальные символы:

- константы — это числа, логические значения и строки Unicode с обычной семантикой;
- пропозициональные переменные начинаются знаком доллара и продолжаются последовательностью букв или цифр, например **\$x10**, **\$saved_args**;
- идентификаторы — последовательности из букв и цифр;
- конструкторы термов имеют традиционный функциональный вид $f(x_1, \dots, x_n)$;
- в языке используются знаки \rightarrow , $[[]]$, $\&$, $|$, $\&\&$, $||$, $+$, $-$, $*$, $/$, $//$, \wedge , \ll , \gg , \lt , \leq , \gt , \Rightarrow , \equiv , \neq , $!$;
- комментарии — это строки, начинающиеся знаком $\#$.

В целях удобочитаемости в TermWare определен синтаксис, подобный языку C. Выражение $x [[y]] \rightarrow z // v$ является сокращением для $rule(x, y, z, v)$ и обозначает переписывающее правило с входным образцом

x , условием y , выходным образцом z и действием v . В случае, если один или несколько элементов отсутствуют, они могут быть опущены. Далее установлено соответствие для других выражений языка и их сокращений: $\{x | y\}$ — является сокращением для $set_pattern(x, y)$; $\{x_1, \dots, x_N\}$ — для $set(x_1, \dots, x_N)$; $x \text{ in } y$ — для $_in(x, y)$; $[x_1, \dots, x_N]$ — для $cons(x_1, cons(\dots, cons(x_N)\dots))$; $x ? y: z$ — для $ifelse(x, y, z)$; $x + y$ — для $plus(x, y)$ и аналогично для всех инфиксных операторов языка C.

Переписывающие правила объединяются в наборы с помощью термина *ruleset*, например, набор правил, описывающий булеву алгебру, описывается так:

```
ruleset(
  $x & ($x => z) -> $z,
  not($x & $y) -> not($x) | not($y),
  not($x | $y) -> not($x) & not($y),
  $x & ($y | $z) -> ($x & $y) | ($x & $z),
  not(not($x)) -> $x,
).
```

Термальная система описывается с помощью выражения $System(x, y, z, v)$, например:

```
System(BooleanAlgebra, default,
  ruleset(
    $x & ($x => z) -> $z,
    not($x & $y) -> not($x) | not($y),
    not($x | $y) -> not($x) & not($y),
    $x & ($y | $z) -> ($x & $y) | ($x & $z),
    not(not($x)) -> $x,
  ),
  FirstTop);
```

Здесь первый подтерм — это имя системы, второй — имя базы данных фактов, после чего следуют набор правил переписывания и стратегия применения. В приведенной выше схеме использована пустая баз данных и стратегия переписывания *FirstTop*.

База данных фактов и стратегия переписывания определяются на уровне процедурного языка в зависимости от предметной области. Как это происходит, покажем в следующем разделе,

а пока обратим внимание еще на две особенности языка. Система имен в TermWare представляет собой иерархию с целью структуризации информации: подсистемы можно организовывать в области (domains) так же, как в Java классы объединять в пакеты (packages). Термальные системы могут повторно использовать информацию с помощью механизма импорта правил аналогично механизму наследования в объектно-ориентированных языках.

```
System(BooleanLogic, default,
  ruleset(import(BooleanAlgebra),
    true => $x -> $x,
    false => $x -> not($x),
    true | $x -> true,
    false | $x -> $x,
    true & $x -> $x,
    false & $x -> false,
    not(true) -> false,
    not(false) -> true
  ), FirstTop)
```

4. Встраивание в приложения

Преыдущие примеры систем несколько ограничены и не используют основные элементы новизны динамической модели — БД фактов и действия. Отчасти это вызвано тем, что TermWare предназначается для встраивания в приложения, а БД фактов и набор действий зависит от конкретных особенностей приложений. Встраивание элементов логического вывода в приложения и проектирование набора БД фактов и действий при использовании TermWare обычно осуществляются по следующей стратегии:

- в программе выделяется подсистема, где уместно использовать декларативные правила;
- определяется взаимодействие с остальной частью комплекса в виде набора функций получения информации (условий) и передачи информации (действий);
- полученный набор взаимодействий представляется в виде Java-

класса (который должен реализовать интерфейс IFacts);

- определяется стратегия применения правил: при этом либо выбирается одна из существующих, либо программируется реализация интерфейса IStrategy;

- происходит встраивание TermWare в приложение либо с помощью прямого вызова конструктора объекта ItermSystem, либо путем определения на языке TermWare соответствия между именами БД фактов (стратегий) и реализующими их классами Java.

Общая схема создания БД фактов путем реализации интерфейса Ifacts имеет следующий вид:

```
public interface IFacts
{
  public String getDomainName();
  public boolean check(ITerm t)
    throws TermWareException;
  public void set(ITerm t) throws
    TermWareException;
  public void remove(ITerm t) throws
    TermWareException;
}
```

Когда при интерпретации правил переписывания встречается запрос информации из внешней среды, TermWare вызывает метод check ассоциированной базы данных фактов; если встречается действие, вызывается метод set. Существует вспомогательный класс DefaultFacts, который с помощью рефлексивного прикладного интерфейса Java самостоятельно осуществляет разбор аргументов.

Собственно термы представляются разработчику как объекты, реализующие интерфейс ITerm. В сигнатуре ITerm определены операции определения типа, доступа к типизированным значениям, унификации, эквивалентности и лексикографического сравнения. Объем статьи не позволяет привести здесь эту сигнатуру полностью. Для демонстрации возможностей программирования приведем в качестве примера описание широко извест-

ной игры Конвея "жизнь" [15], используя БД фактов для представления информации о поле. Соответствующая термальная система выглядит следующим образом:

```
domain(examples,
  system(Life1,LifeDB,
    ruleset(
      # $T - set of pairs to test.
      { l($i,$j) | $T } [| existsCell($i,
        $j) ) && (n($i,$j)==2||n($i,$j)==3)
      || -> $T // putCell($x,$y),
      { l($i,$j) |$T } [| n($i,$j) == 3
      || -> $T // putCell($x,$y),
      { l($i,$j) |$T } [| n($i,$j) <2 ||
        n($i,$j)>3 || -> $T // remove-
        Cell($x,$y),
      { } -> $T // showGeneration() &&
        createNewTestSet($T)
    ),
  FirstTop)
);
```

Как видно, из БД запрашиваются следующие факты и условия: 1) *existsCell(i, j)* — существует ли клетка по адресу *i, j* и 2) *n(i, j)* — количество соседей клетки. К действиям относятся:

- *putCell(i, j)* — поместить клетку в ячейку *i, j*;
- *removeCell(i, j)* — удалить клетку;
- *showGeneration()* — показать на экране следующее поколение;
- *createNewTestSet(\$T)* — сгенерировать новое тестовое множество клеток.

В сокращенном виде соответствующий класс БД выглядит следующим образом:

```
class LifeFieldFacts extends
  DefaultFacts
{
  private int nX_;
  private int nY_;
```

```
private boolean[][] field_;
private boolean[][] nextField_;
private Canvas drawing_;
public ITerm existsCell(ITerm tx,
  ITerm ty) throws TermWare-
  Exception
{
  int x = tx.getInt();
  int y = ty.getInt();
  return ITermFactory.create-
    Boolean(field_[x%nX][y%nY]);
}

public void putCell(ITerm tx,
  ITerm ty) throws TermWareException
{
  int x = tx.getInt();
  int y = ty.getInt();
  nextField_[x%nX][y%nY] = true;
}

public void generateNewTest-
  Set(ITerm t) throws
  TermWareException
{
  if (!t.isX()) {
    throw new TermWareException ("ar-
      gument of generateNewTestSet mus-
      be propositional variable");
  }
  SetTerm retval = ITermFac-
    tory.createSet();
  field_ = nextField_;
  nextField_ = createNewField();
  for(int i=0; i<nX; ++i) {
    for(int j=0; j<nY; ++j) {
      if (field_[i][j]) {
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i-1)%nX, (j-1)%nY));
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i-1)%nX, (j) %nY));
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i-1) %nX, (j+1)%nY));
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i) %nX, (j-1) %nY));
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i) %nX, (j) %nY));
        retval.insert(createComplex-
          Term2("1", (i) %nX, (j+1)%nY));
```



```

retval.insert(createComplex-
  Term2("l", (i+1) %nX, (j-1)%nY));
retval.insert(createComplex-
  Term2("l", (i+1) %nX, (j) %nY));
retval.insert(createComplex-
  Term2("l", (i+1) %nX, (j+1)%nY));
}
}
}
// fill the value of the proposi-
  tional variable.
tx.subst(tx.minFv(), retval);
}
}

```

Обратим внимание на подстановку вместо пропозициональной переменной множества в действии `generateNewTestSet`. Этот пример иллюстрирует передачу информации из императивной части программы в ее логическую часть.

Выводы

Таким образом, разработанная система дает возможность проектировать интеллектуальную составляющую приложений с учетом существующих технологических платформ и естественно сочетать императивный и логический стили программирования с помощью общей объектно-ориентированной среды. Это облегчает как проектирование приложений, так и модификацию бизнес-логики, которую можно задавать независимо от внешней среды.

В настоящее время TermWare применяется в системах организации потока работ, где с помощью логических правил описываются бизнес-процессы, а в качестве БД фактов выступает взаимодействие с исполнителями и данными о текущем состоянии бизнес-процессов [16]. Еще одна область применения — это анализ структур программ, позволяющая выделять шаблоны проектирования [17] и проводить анализ корректности кода относительно известного множества типичных погрешностей проектирования [18]. Особенный интерес представляет семантический анализ моде-

лей UML[19] в распределенных программных комплексах [20], [21].

Система TermWare реализована в ООО Град-Софт. Более детальное описание и некоторые приложения доступны на Web-странице: <http://www.gradsoft.kiev.ua>

1. *Dershowitz N., Jouannaud J.-P.* Rewrite Systems // Handbook of Theoretical Computer Science. Vol. B: Formal Models and Semantics / Ed. J. van Leeuwen. — Boston: Elsevier and MIT Press, 1990. — P. 243–320.
2. АНАЛИТИК–74 / В.М. Глушков, Т.А. Гринченко, А.А. Дородницына и др. // Кибернетика. — 1978. — № 5. — С. 114–147.
3. Капитонова Ю.В., Лetichevский А.А. Методы и средства алгебраического программирования // Кибернетика и системный анализ. — 1993. — № 3. — С. 7–12.
4. *Parallel Symbolic Simulation Using the Algebraic Programming System* / A.A. Letichevsky, J.V. Kapitonova, A.E. Doroshenko, V.A. Volkov // Algebraic Engineering: Proc. Intern. Conf. on Semigroups and Algebraic Engineering. — Singapore: World Scientific, 1999. — P. 350–360.
5. *Refal-5: Programming Guide and Reference Manual*. — Holyoke MA: New England Publishing Co., 1989. — 342 p.
6. *Semantics of Constraint Logic Programs* / J. Jaffar, M.J. Maher, K.G. Marriott, P.J. Stuckey // J. of Logic Programming, — 1998. — **37**. — P. 1–46.
7. *Milner R.* Communicating and Mobile Systems: the π -calculus. — Cambridge: University Press, 1999. — May. — 174 p.
8. *Winkler T.* Programming in OBJ and Maude // Functional Programming, Concurrency, Simulation and Automated Reasoning / Ed. P. Lauer. — LNCS. — 1993. — **693**. — P. 229–277.
9. *Visser E.* Stratego: A language for program transformation based on rewriting strategies. System description of Stratego 0.5 // Rewriting Techniques and Applications (RTA'01) / Ed. A. Middeldorp, Ibid. — 2001. — **2051**. — P. 357–361.
10. *Gelernter D. Carriero N.* Coordination Languages and Their Significance // Comm. ACM. — 1992. — **35**, № 2. — P. 97–107.
11. *JSR-000094 Java™ Rule Engine API*. — <http://www.jcp.org/aboutJava/communityprocess/review/jsr094/>.
12. *Jess* — the expert system shell for the Java Platform. — http://herzberg.ca.sandia.gov/jess/ri_overview.shtml.
13. *Efficient annotated terms* / M.G.J. van den Brand, H. de Jong, P. Klint, P. Olivier // Software, Practice & Experience. — 2000. — **30**(3). — P. 259–291.
14. Капитонова Ю.В., Лetichevский А.А. Математическая теория проектирования вычис-

- лительных систем. — М.: Наука, 1988. — 296 с.
15. Эндрюс Г.Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования. — М.: Вильямс, 2003. — 506 с.
 16. Shevchenko R., Doroshenko A. Managing Business Logic with Symbolic Computation // Information Systems Technology and Applications: Proc. 2-nd Intern. Conf. ISTA'2003, June 19–21, 2003, Kharkiv, Ukraine. — Kharkiv, 2003. — P. 143–152.
 17. *Design Patterns: Elements of Reusable Object Oriented Software* / E. Gamma, R. Helm R. Jonhson, J. Vlissides. — Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. — 329 p.
 18. Liang, M., Harold J. Light-Weight Context Recovery for Efficient and Accurate Program Analysis // ICSE 2000: Proc. 22-nd Intern. Conf. Software Engineering, June 4–11, 2000, Limerick, Ireland. — New York: ACM Press, 2000. — P. 366–406.
 19. UML 2.0 Specification. — <http://www.omg.org/technology/uml/>.
 20. Shevchenko R., Doroshenko A. Evolution of CORBA Framework: An Experience Study, Case studies of CSMR 2002, Workshop Proc. 6-th European Conf. on Software Maintenance and Reengineering, March 11–13, 2002, Budapest, Hungary. — Budapest, 2002. — P. 3–9.
 21. Shevchenko R., Doroshenko A. A Method of Mediators for Building Web Interfaces of CORBA Distributed Enterprise Applications // Information Systems Technology and its Applications: Proc. Intern. Conf. ISTA-2001, June 13–15, 2001, Kharkiv, Ukraine. — Kharkiv, 2001. — 4. — P. 53–63.

Получено 23.11.03

Об авторах

Дорошенко Анатолий Ефимович,

доктор физ.-мат.наук, профессор,
заместитель директора по научной
работе

Шевченко Руслан Сергеевич,

аспирант

Место работы авторов

Институт программных систем НАН Украины,
просп. Академика Глушкова, 40,
Киев-187, 03680, Украина
Тел. 266 1538
E-mail: dor@isofts.kiev.ua,
Ruslan@Shevchenko.kiev.ua