

УДК 004.738:004.94

Мартынюк А. Н., к.т.н.,
Сугак А. С.,
Хабиб Альшикх

ОПЕРАЦИИ РАСШИРЕННОЙ ТЕСТОВОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Аннотация. Введена объединенная модель тестовой и вирусной эволюций, представляющая условия синтеза поведенческого теста расширенной управляемости для проверяемых автоматных моделей компонентов распределенной информационной системы (РИС) на основе идентификации поведения опорных состояний. Рассмотрены генетические операции взаимодействующих эволюционных систем, развивающие целевую популяцию от тестовых примитивов через тестовые и связующие фрагменты к поведенческим тестам. Объединенная модель эволюций позволяет быстрее определить условия построения поведенческих тестов, что на этапе проектирования РИС уменьшает время, необходимое для подготовки тестового обеспечения.

Ключевые слова: поведенческий тест, идентификатор, тестовый фрагмент, эволюционная система, генетические операции

Martynyuk O. N., Ph.D.,
Sugak H. S.,
Habib Alshikh

OPERATIONS OF EXPANDED TEST EVOLUTION

Abstract. Introduced unified model test and viral evolution, representing a synthesis of the behavioral conditions of the test-enhanced manageability for checked automata models of components of distributed information system (RIS) on the basis of identifying the behavior of the reference states. We consider genetic operation interacting evolutionary systems, developing target population of test primitives through test and binding fragments to the behavioral tests. The combined model of evolution to determine the conditions of construction of behavioral tests faster, the design phase of RIS reduces the time required for preparation of test software.

Keywords: behavioral test identifier, the test piece of the system evolution, genetic operations

Мартинюк О. М., к.т.н.,
Сугак Г.С.,
Хабиб Альшикх

ОПЕРАЦІ РОЗШИРЕНОЇ ТЕСТОВОЇ ЕВОЛЮЦІЇ

Анотація. Введена об'єднана модель тестової і вірусної еволюції, що представляє умови синтезу поведінкового тесту розширеної керованості для перевіряються автоматних моделей компонентів розподіленої інформаційної системи (РИС) на основі ідентифікації поведінки опорних станів. Розглянуто генетичні операції взаємодіючих еволюційних систем, розвиваючи цільову популяцію від тестових примітивів через тестові і сполучні фрагменти до поведінкових тестів. Об'єднана модель еволюції дозволяє швидше визначити умови побудови поведінкових тестів, що на етапі проектування РИС зменшує час, необхідний для підготовки тестового забезпечення.

Ключові слова: поведінковий тест, ідентифікатор, тестовий фрагмент, еволюційна система, генетичні операції

Введение

В ряду требований к перспективным распределенным информационным системам (РИС) наряду с производительностью, надежностью, мультиплатформенностью присутствует ресурсосбережение. В обеспечении работоспособности РИС системы технического диагностирования, выполняющие рабочий и тестовый контроль, выполняют основную роль. Высокая

сложность РИС, общность и неполнота системно-функциональных описаний [1], ограниченность наблюдения и управления для большинства компонентов РИС стимулирует, в частности, развитие формализованных комплексных моделей и методов контроля и диагноза, в частности, и тестирования, основанных на композициях структурных, поведенческих, информационных представлений объектов и процессов [2], интеллектуальных подходов [3]. К необходимым

свойствам РИС относят и возможность понижения затрат этапов жизненного цикла РИС и систем технического диагностирования и тестирования.

Сложность тестирования и, в частности, синтеза тестов обусловлена необходимостью перебора вариантов в поиске решений, особенно для функциональных моделей РИС [4]. Это обстоятельство обусловило развитие декомпозиционных [5] и эволюционно-генетических методов построения тестов [6,7,8], позволяющих достичь снижения *NP*-трудности задач тестирования. Вместе с тем, комплексирование этих моделей и методов, в частности, для поведенческого синтеза тестов, определяет целесообразность развития формализации новых подходов.

В этой связи актуально исследование моделей и методов синтеза тестов, использующих псевдослучайный целевой поиск эволюционных систем (ЭС) и методы генетического программирования (ГП) [9] для идентификации свойств в автоматных контрольных экспериментах [10].

Постановка задачи

Цель работы – сокращение времени для синтеза тестов поведенческого диагностирования компонентов РИС. Класс ошибок – искажения функциональных отображений автоматных моделей РИС. Направление исследования – построение эволюционных моделей и методов с модифицированной сигнатурой генетических операций для представления процесса синтеза тестов – контрольных экспериментов автомата *a*, идентифицирующих его проверяемые свойства.

Поставленная цель достигается на базе решения задачи построения специальной тестовой эволюции (*te*), во-первых, основанной на моделях и операциях генетического программирования в популяции поведенческих тестовых особей нелинейной структуры, во-вторых, обладающей особенностями идентификации проверяемых свойств в тестах – контрольных экспериментах, построенных на базе тестовых особей – примитивов и фрагментов автоматного поведения.

Под тестовым фрагментом *tf* [11] понимается часть тестового вход-выходного поведения автомата *a*, лежащая в диапазоне от некоторого неделимого тестового примитива *tp*, идентифицирующего некоторое свойство, до некоторого полного поведенческого тестового эксперимента *tex* для этого автомата.

Построение тестовой эволюции *te* предполагает предшествующее построение специальной автоматной модели тестирования *ta* [12], позволяющей определить условия синтеза поведенческого теста *tex* для РИС, в то время как *te* собственно и выполняет этот синтез.

Эволюционный метод синтеза тестов

Пусть некоторый *i*-й компонент РИС представлен автоматом $a_i \in A$ из множества автоматов *A*, представляющего все компоненты РИС. Модель *i*-го компонента – расширенный временной недетерминированный автомат $a_i \in A$, где $a_i = (S_i, X_i, Y_i, T_i, Pb_i, \delta_i, \lambda_i)$ или ему соответствующий полуавтомат $a_{U_i} = (S_i, U_i, \Delta_i)$, здесь и далее $U_i = X_i \times Y_i$, $\Delta_i: S_i \times U_i \rightarrow S_i$, $W_i = U_i^*$ – множество слов в алфавите U_i [12].

Эволюционная система (ЭС), как модель псевдослучайного целенаправленного синтеза поведенческого теста *tex* для компонента РИС – расширенного автомата a_i или a_{U_i} с модифицированной сигнатурой операций имеет вид:

$$Te_i = (Tf_i, Tp_i, Lp_{ti}, Sg_{ti}, Tf_{ji}), \quad (1)$$

где:

– Tf_i, Tp_i, Lp_{ti} – представленные в расширенном вход-выходном алфавите $U_j'' = X_j \times Y_j \times T \times Pb$ множества соответственно тестовых фрагментов из регулярного множества $Tf_j \subseteq S \times U_j''^* \times S$ – тестовых вход-выходных слов с соответствующими стартовыми и финальными состояниями, начальное (в эволюции) множество тестовых примитивов $Tp_i = Tf_{0i} \subseteq Tf_i$, соответствующих им связующих примитивов Lp_{ti}, Tf_{ji} – финальное множество тестовых фрагментов, удовлетворяющее предъявляемым требованиям по полноте, длине и кратности;

– $Sg_{ti} = \{\mu_{ti}, \kappa_{ti}, \phi_{ti}, \rho_{ti}, \sigma_{ti}\}$ – сигнатура ЭС, содержащая:

а) $\mu_{ti}: Tf_i \times W_i^\wedge \rightarrow Tf_i$ – частичную бинарную операцию мутации на основе некоторого, в частности, псевдослучайного, замещения/расширения собственного поведения из W_i автомата a_i некоторым другим совместимым (смежным по опорным состояниям) внешним (инфицирующим для a_i – см. ниже) поведением из W_i^\wedge , особенность операции – возможность отображения внесения в тестовую популяцию «чистого» вируса без парного взаимодействия с тестовой особью, имеющего вид $\mu_{ti}: \emptyset \times W_i^\wedge \rightarrow Tf_i$, что может быть использовано при начальной инициализации пустой тестовой популяции;

б) $\kappa_{ti}: Tf_i \times Tf_i \rightarrow Tf_i$ – частичную бинарную операцию многоточечного кроссинговера на основе некоторого замещения/расширения собственного поведения из W_i автомата a_i совместимым (смежным по опорным состояниям) с некоторым другим собственным поведением из W_i автомата a_i ;

в) $\phi_{ti}: Tf_i \times W_i^\wedge \rightarrow Tf_i$ – частичную бинарную операцию иммунитета на основе поиска имевшего ранее место, сохраненного мутационного

опыта – как следует из операции мутации μ_{agDi} , некоторого замещения/расширения собственного поведения из W_i автомата a_i другим совместимым внешним поведением из W_i^{\wedge} автомата a_i^{\wedge} ;

г) $\varphi_i: Tf_i \times \Pi_{\varphi_i} \rightarrow Tf_i'$ – трехосновную фитнес-функцию, где множества $Tf_i' = Tf_i \times \Pi_{\varphi_i}'$, $\Pi_{\varphi_i} = \Pi_{\varphi_i Ri} \times \Pi_{\varphi_i Di}$ – внутренний приоритет, в котором $\Pi_{\varphi_i Ri}$ – опционный псевдослучайный и $\Pi_{\varphi_i Di}$ – многокритериальный директивный приоритет, Π_{φ_i}' вычисленный векторный $\Pi_{\varphi_i}' = \varphi_i^{Vect}(\Pi_{\varphi_i})$ или скалярный $\Pi_{\varphi_i}' = \varphi_i^{Scal}(\Pi_{\varphi_i})$ приоритет;

д) $\sigma_i: Tf_i' \times \Pi_{\sigma_i} \rightarrow Tf_i$ – трехосновную функцию выбора для мутации и кроссинговера, здесь $\Pi_{\sigma_i} = \Pi_{\sigma_i Ri} \times \Pi_{\sigma_i Di}$ – псевдослучайный $\Pi_{\sigma_i Ri}$ и директивный $\Pi_{\sigma_i Di}$ внешний приоритет выбора, являющийся корректирующим для внутреннего приоритета Π_{φ_i} .

Действия эволюции Te_i и ее порождающих функций мутации μ_i и кроссинговера κ_i с объектами популяций T_{+i} и Ω_{+i} автомата a_i , для которого синтезируются тесты, дополняются известными в автоматных экспериментах преобразованиями $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ при анализе множества слов W_i'''' априорного поведения автомата a_i в виде последовательностей строчных автоматов [10]. Строчные автоматы в результате применения только стратегии преобразований $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ к множеству W_i'''' формируют последовательность вида $C = (C_0, C_1, \dots, C_j, C_{j+1}, \dots, C_f)$, приводящую к предельному автомату C_f , с выявлением идентификаторов Ti_i на основе априорной информации $\{\tau_i, \sigma, \eta, \tau, \nu\}$ об автомате a_i . Здесь σ, η, τ, ν – отношения совместимости, несовместимости, неопределенности, предпорядка на множестве Ti_i .

Любой из строчных автоматов – частичный автомат вида $C_j = (L_j, U_j'', Z_j, \Delta_j, \Lambda_j)$, в котором:

а) L_j – опорные состояния, приводимые в соответствие с состояниями S автомата a_i ;

б) U_j'' – введенный ранее для a_i расширенный вход-выходной алфавит;

в) Z_j – исходные метки для опорных состояний L_j , обычно ассоциируемые с состояниями из S_i ;

г) $\Delta_j: L_j \times U_j'' \times N \rightarrow L_j$ – частичная доопределяемая временная функция переходов;

д) $\Lambda_j: L_j \times N \rightarrow Z_j$ – частичная доопределяемая временная функция разметки.

Преобразования $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ выполняются:

1) – приписыванием символа $z_j \in Z_j$ из C_j опорному состоянию l_j из некоторого фрагмента поведения $w_i'' \in W_i''''$ при подтверждении символа z_j некоторым соответствующим идентификатором $t_{i_i} \in Ti_i(z_j)$, то есть $z_j = \alpha(w_i'', l_j, t_{i_i}) \rightarrow z_j = \Lambda_j(l_j)$;

2) – отождествлением одинаково отмеченных некоторым символом z_j состояний l_{1j} и l_{2j} , то есть $(z_j = \Lambda_j(l_{1j}) = \Lambda_j(l_{2j})) \rightarrow (l_{1j} \equiv l_{2j})$;

3) – детерминизацией поведения для состояний, отмеченных некоторым символом $z_j \in Z_j$, имеющей место в эталонном недетерминированном C_j , то есть $((z_j = \Lambda_j(l_{1j}) = \Lambda_j(l_{2j}) \ \& \ u_{1j} = u_{2j} = u_j'' = (u_j, t_j, pb_j)) \rightarrow (l_{1j} \equiv l_{2j})) \rightarrow (l_{2j}' = \Delta_j(l_{1j}, u_{1j}'') \equiv l_{2j}' = \Delta_j(l_{2j}, u_{2j}''))$, если $(u_j'' = (u_j, t_j, pb_j) \ \& \ pb_j = 1)$.

Стратегия синтеза конкретного поведенческого теста, реализуемая для формальной модели тестирования [11] с применением идентификаторов Ti_i , тестовых Tr_i и связующих Lr_i примитивов, тестовых фрагментов Tf_i определяется последовательностью преобразований $\{\alpha, \beta, \gamma\}$, которые выполняются для автоматов C_j из последовательности $(C_0, \dots, C_j, \dots, C_f)$, и может быть эволюционной [12]. В эволюционном случае стратегия дополнена генетическими операциями, может быть не линейна, обладать параллелизмом и иметь вид сетевого графа-гамака, в котором сходящиеся ветвления образованы парами особей – операндов кроссинговера или мутации.

В распознавании автоматной функции переходов/выходов Δ_i восстанавливается структура автомата a_i для его априорно известного поведения W_i'''' . Промежуточные и итоговые результаты применения преобразований $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ – автоматы из $C = (C_0, C_1, \dots, C_j, C_{j+1}, \dots, C_f)$, характеризующие распознанную часть автомата a_i . Переходы и линейные участки переходов автоматов из C могут быть отмечены элементами множества $W_i'''' \leq W_i''''$, соответственно множеством U_i'''' примененных символов из множества U_i'''' и множеством примененных слов из W_i'''' , при этом $U_i'''' \subseteq W_i''''$.

Таким образом, представление распознанной части автомата a_i на некотором j -ом шаге анализа поведения W_i'''' выполняется частичным автоматом $C_{ij} = (L_{ij}, W_{ij}'', Z_{ij}, \Delta_{ij}, \Lambda_{ij})$.

В основе выполнения операций кроссинговера и мутации – обычные множественные автоматные операции $\{\cup, \cap, \setminus, -\}$ – автоматных объединения, пересечения, разности, дополнения, а также операции однофрагментного $\langle \langle / \rangle \rangle$ и двухфрагментного симметрического $\langle \langle \div \rangle \rangle$ замещения/обмена поведения $W_{i1j}'''' \sim Z_{i1j} \sim Z_{i2j}$ и $W_{i2j}'''' \sim Z_{i1j} \sim Z_{i2j}$ в границах выделенных отождествляемых состояний из L_{i1j} и L_{i2j} , отмеченных общими метками из $Z_{i1j} \cap Z_{i2j} \neq \emptyset$.

Таким образом, для $C_{i1j} = (L_{i1j}, W_{i1j}'', Z_{i1j}, \Delta_{i1j}, \Lambda_{i1j})$ и $C_{i2j} = (L_{i2j}, W_{i2j}'', Z_{i2j}, \Delta_{i2j}, \Lambda_{i2j})$ и $C_{ij}' = (L_{ij}', W_{ij}'', Z_{ij}', \Delta_{ij}', \Lambda_{ij}')$ справедливо:

1) Объединение: $C_{i1j} \cup C_{i2j} = C_{ij}' \rightarrow C_{ij}' = (L_{i1j} \cup L_{i2j}, W_{i1j}'' \cup W_{i2j}'', Z_{i1j} \cup Z_{i2j}, \Delta_{i1j} \cup \Delta_{i2j}, \Lambda_{i1j} \cup \Lambda_{i2j})$;

2) Пересечение: $C_{i1j} \cap C_{i2j} = C_{ij}' \rightarrow C_{ij}' = (L_{i1j} \cap L_{i2j}, W_{i1j} \cap W_{i2j}, Z_{i1j} \cap Z_{i2j}, \Delta_{i1j} \cap \Delta_{i2j}, A_{i1j} \cap A_{i2j})$;

3) Разность: $C_{i1j} \setminus C_{i2j} = C_{ij}' \rightarrow C_{ij}' = (L_{i1j} \setminus L_{i2j}, W_{i1j} \setminus W_{i2j}, Z_{i1j} \setminus Z_{i2j}, \Delta_{i1j} \setminus \Delta_{i2j}, A_{i1j} \setminus A_{i2j})$;

4) Дополнение: $\neg C_{i1j} = (L_{i1j}, W_{i1j}, Z_{i1j}, \neg \Delta_{i1j}, A_{i1j})$;

5) Замещение: $C_{i1j} / C_{i2j} = C_{ij}' \rightarrow C_{ij}' = (L_{i1j}, W_{i1j} \setminus W_{i2j} \cup W_{i2j} \setminus W_{i1j}, Z_{i1j} \setminus Z_{i2j} \cup Z_{i2j} \setminus Z_{i1j}, \Delta_{i1j} \setminus \Delta_{i2j} \cup \Delta_{i2j} \setminus \Delta_{i1j}, A_{i1j})$;

6) Симметрическое замещение: $C_{i2j} \div C_{i1j} = C_{ij}' \rightarrow (C_{i1j} / C_{i2j}) \cup (C_{i2j} / C_{i1j})$.

Операция многоточечного кроссинговера κ_i автомата a_{U_i} , как множество операндов, принимает множество пар вида $(tf_i, tf_{2i}) \in Tf_i \times Tf_i$ в пространстве W_i поведения тестовой эволюции Te_i автомата a_i . Операция кроссинговера κ_i , порождая очередные объекты популяции T_{+i} для множества Tf_i , может быть двух типов – расширяющего и модифицирующего.

Пусть на очередном j -м шаге два операнда кроссинговера κ_i – тестовые фрагменты – представлены автоматами $tf_{1ij} = (L_{1ij}, W_{1ij}, Z_{1ij}, \Delta_{1ij}, A_{1ij})$, $tf_{2ij} = (L_{2ij}, W_{2ij}, Z_{2ij}, \Delta_{2ij}, A_{2ij})$. Здесь W_{1ij}, W_{2ij} – текущее состояние структуры анализа частного (собственного) тестового поведения, Z_{1ij}, Z_{2ij} – текущие выявленные (примененные) метки состояний. Результат операции кроссинговера в случае, когда она определена, – новый, расширенный или модифицированный тестовый фрагмент $tf_{ij}' = (L_{ij}', W_{ij}', Z_{ij}', \Delta_{ij}', A_{ij}')$.

Тогда операция кроссинговера κ_i имеет вид:

$$\kappa_i(tf_i, tf_{2i}) = \begin{cases} tf_i' = tf_i \cup tf_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \kappa_i - \\ & \text{расширяющего типа} \\ tf_i' = tf_i / tf_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \kappa_i - \\ & \text{модифицирующего типа} \\ tf_i' = tf_i \div tf_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \kappa_i - \\ & \text{симметрического} \\ & \text{модифицирующего типа} \\ \text{не определено,} & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} = \emptyset. \end{cases} (2)$$

Операция вирусной мутации μ_i автомата a_{U_i} , как и операция кроссинговера κ_i , в качестве множества операндов принимает множество пар вида $(tf_i, \omega f_i) \in (Tf_i \cup \emptyset) \times \Omega f_i$ в пространствах W_i и W_i^{\wedge} поведения тестовой Te_i и вирусной Ωe_i эволюций соответственно автоматов a_i и a_i^{\wedge} . Автомат a_i^{\wedge} , определяющий пространство вирусного поведения, может не совпадать с автоматом a_i . Операция мутации μ_i , порождая инфицированные (мутированные) объекты популяции $\Psi_{+i} \subseteq T_{+i}$ для множеств Tf_i и Ωf_i , как и кроссинговер, могут быть расширяющими и модифицирующими.

Пусть на очередном j -м шаге два операнда мутации μ_i – тестовый и вирусный фрагменты – представлены автоматами $tf_{ij} = (L_{1ij}, W_{1ij}, Z_{1ij}, \Delta_{1ij}, A_{1ij})$, $\omega f_{ij} = (L_{2ij}, W_{2ij}, Z_{2ij}, \Delta_{2ij}, A_{2ij})$. Здесь W_{1ij}, W_{2ij} – текущее состояние структуры анализа частного (собственного) тестового и вирусного поведения, Z_{1ij}, Z_{2ij} – текущие выявленные (примененные) метки состояний. Результат операции мутации в случае, когда она определена, – новый, расширенный или модифицированный инфицированный тестовый фрагмент $\psi f_{ij}' = (L_{ij}', W_{ij}', Z_{ij}', \Delta_{ij}', A_{ij}')$.

Операция мутации μ_i имеет вид:

$$\mu_i(tf_i, \omega f_{2i}) = \begin{cases} tf_i' = tf_i \cup \omega f_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \mu_i - \\ & \text{расширяющего типа} \\ tf_i' = tf_i / \omega f_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \mu_i - \\ & \text{модифицирующего типа} \\ tf_i' = tf_i \div \omega f_{2i}, & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} \neq \emptyset \text{ и } \mu_i - \\ & \text{симметрического} \\ & \text{модифицирующего типа} \\ \text{не определено,} & \text{если } Z_{1ij} \cap Z_{2ij} = \emptyset. \end{cases} (3)$$

Операция иммунитета ϕ_i автомата a_{U_i} , как и операция мутации μ_i , в качестве операндов принимает множество пар вида $(tf_i, \omega f_i) \in (Tf_i \cup \emptyset) \times \Omega f_i$ в пространствах W_i и W_i^{\wedge} поведения тестовой Te_i и вирусной Ωe_i эволюций соответственно автоматов a_i и a_i^{\wedge} . Но в отличие от мутации иммунитет не порождает инфицированные (мутированные) объекты популяции $\Psi_{+i} \subseteq T_{+i}$ для множества Tf_i , а выполняет поиск предыдущего опыта для возникшей пары операндов $(tf_i, \omega f_i)$. Операнды tf_i и ωf_i – это, как было отмечено ранее, автоматные структуры, следовательно, для ускорения их поиска в накопленном опыте эволюции целесообразно применять специальные инварианты отмеченных графов (автоматов). В качестве таких инвариантов используются натуральные числа β и числовые вектора $(\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n)$ в позиционной системе, вычисляемые автоматной хэш-функцией $\eta \phi_i$ в момент появления операндов-фрагментов на основании их спискового представления. На множестве инвариантов-векторов определено отношение лексиграфического упорядочения. Множества упорядоченных инвариантов и соответствующих им фрагментов образуют хэш-таблицу иммунного поиска. Введены три хэш-таблицы – таблица $Tab_{\beta_{tf_{ij}}}$ хэш-значений $\beta_{tf_{ij}} = \eta \phi_i(tf_{ij})$ тестовых фрагментов tf_{ij} , таблица $Tab_{\beta_{\omega f_{ij}}}$ хэш-значений $\beta_{\omega f_{ij}} = \eta \phi_i(\omega f_{ij})$ инфицирующих фрагментов ωf_{ij} , таблица $Tab_{\beta_{tf_{ij}, \omega f_{ij}}}$ хэш-пар $(\beta_{tf_{ij}}, \beta_{\omega f_{ij}})$ тестовых tf_{ij} и вирусных ωf_{ij} фрагментов и получаемых для них иммунных

фрагментов ψ_{fij} и их хэш-значений $\beta_{\psi_{fij}} = \eta\phi_i(\psi_{fij})$. Операция иммунитета ϕ_i , выполняя поиск имеющих место ранее инфицированных (мутированных) объектов популяции $\Psi_{+i} \subseteq T_{+i}$ для множеств T_{fi} и Ω_{fi} , как и мутация, может быть двух типов – расширяющего и модифицирующего.

Пусть на j -м шаге, как и в мутации μ_{ij} , два операнда операции иммунитета ϕ_i – тестовый и вирусный фрагменты – представлены автоматами $tf_{ij} = (L_{1ij}, W_{1ij}, Z_{1ij}, \Delta_{1ij}, A_{1ij})$, $of_{ij} = (L_{2ij}, W_{2ij}, Z_{2ij}, \Delta_{2ij}, A_{2ij})$. Результат операции мутации в случае, когда она определена, – ранее полученный и найденный в хэш-таблице, расширенный или модифицированный инфицированный тестовый фрагмент $\psi'_{fij} = (L'_{ij}, W'_{ij}, Z'_{ij}, \Delta'_{ij}, A'_{ij})$.

Операция иммунитета ϕ_i имеет вид:

$$\phi_i(tf_{ij}, of_{ij}) = \begin{cases} \psi'_{fij} = tf_{ij} \cup of_{ij}, & \text{если } \phi_i - \\ & \text{расширяющего типа и} \\ & (\beta_{\psi'_{fij}}, \beta_{of_{ij}}, \psi'_{fij}, \beta_{\psi_{fij}}) \in Tab_{\beta_{\psi_{fij}}, \beta_{of_{ij}}} \\ \psi'_{fij} = tf_{ij} \div of_{ij}, & \text{если } \phi_i - \\ & \text{модифицирующего типа и} \\ & (\beta_{\psi'_{fij}}, \beta_{of_{ij}}, \psi'_{fij}, \beta_{\psi_{fij}}) \in Tab_{\beta_{\psi_{fij}}, \beta_{of_{ij}}} \\ \psi'_{fij} = tf_{ij} \div of_{ij}, & \text{если } \phi_i - \\ & \text{симметрического} \\ & \text{модифицирующего типа и} \\ & (\beta_{\psi'_{fij}}, \beta_{of_{ij}}, \psi'_{fij}, \beta_{\psi_{fij}}) \in Tab_{\beta_{\psi_{fij}}, \beta_{of_{ij}}} \\ \text{не определено, если } & (\beta_{\psi'_{fij}}, \beta_{of_{ij}}, \psi'_{fij}, \\ & \beta_{\psi_{fij}}) \notin Tab_{\beta_{\psi_{fij}}, \beta_{of_{ij}}}. \end{cases} \quad (4)$$

В определении операции иммунитета обозначенные множественные операции « \cup , \div , \Rightarrow » не выполняются – их выполнение и сохранение результата имело место ранее в эволюции.

Фитнесс-функция φ_i автомата a_{U_i} в качестве операндов принимает множество пар вида $(tf_i, \pi_{\varphi_i}) \in Tf_i \times \Pi_{\varphi_i}$ в пространствах W_i поведения тестовой эволюции Te_i и приоритетов Π_{φ_i} автомата a_{U_i} . В приоритете $\Pi_{\varphi_i} = \Pi_{\varphi_{Ri}} \times \Pi_{\varphi_{Di}}$, как отмечалось, присутствуют опционный псевдослучайный $\Pi_{\varphi_{Ri}}$ и директивный $\Pi_{\varphi_{Di}}$ компоненты. Опционный псевдослучайный приоритет $\pi_{\varphi_{Ri}} \in \Pi_{\varphi_{Ri}}$ тестового фрагмента tf_i в простейшем случае представляется взвешенной псевдослучайной переменной $\pi_{\varphi_{Ri}} = \chi_{\varphi_{Ri}} \cdot \pi_{\varphi_{Ri}}$, где $\pi_{\varphi_{Ri}}$ – псевдослучайная переменная, весовой коэффициент $\chi_{\varphi_{Ri}}$ динамически определяется относительным развитием эволюции автомата a_i в сетевом окружении СА (на фоне развития тестовых эволюций других автоматов – обратная зависимость от собственной достигнутой полноты проверки автомата a_i и прямая зависимость от внешней интегральной полноты проверки автоматов $A\{a_i\}$). Директивный приоритет $\pi_{\varphi_{Di}} \in \Pi_{\varphi_{Di}}$ тестового фрагмента tf_i пред-

ставляется вектором из взвешенных компонентов статической (автомата a_i) и динамической (тестового фрагмента tf_i) составляющих [4]:

$$\pi^{\text{Vect}}_{\varphi_{Di}} = (\chi_{\varphi_{Di}}^{st} \cdot (\chi_{\varphi_{DSi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DSi}}^{st}; \chi_{\varphi_{DXi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DXi}}^{st}; \\ 1/(\chi_{\varphi_{DYi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DYi}}^{st}); \chi_{\varphi_{DEi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DEi}}^{st}; 1/(\chi_{\varphi_{DCi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DCi}}^{st}); \\ 1/(\chi_{\varphi_{DVi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DVi}}^{st})); \chi_{\varphi_{Di}}^{dy} (\chi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy}; \\ 1/(\chi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy}); \\ 1/(\chi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy}); 1/(\chi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy}); \\ \chi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy}; \chi_{\varphi_{D\tau_i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\tau_i}}^{dy}). \quad (5)$$

или скалярной суммой взвешенных компонентов статической (автомата a_i) и динамической (тестового фрагмента tf_i) составляющих:

$$\pi^{\text{Scal}}_{\varphi_{Di}} = \chi_{\varphi_{Di}}^{st} \cdot (\chi_{\varphi_{DSi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DSi}}^{st} + \chi_{\varphi_{DXi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DXi}}^{st} + 1/(\chi_{\varphi_{DYi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DYi}}^{st}) + \chi_{\varphi_{DEi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DEi}}^{st} + \\ + 1/(\chi_{\varphi_{DCi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DCi}}^{st}) + 1/(\chi_{\varphi_{DVi}}^{st} \cdot \pi_{\varphi_{DVi}}^{st})) + \chi_{\varphi_{Di}}^{dy} (\chi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy} + \\ + 1/(\chi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy}) + 1/(\chi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy}) + 1/(\chi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy}) + \\ + \chi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy} + \chi_{\varphi_{D\tau_i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi_{D\tau_i}}^{dy}). \quad (6)$$

Здесь для статической составляющей:

- $\chi_{\varphi_{DSi}}^{st}$, $\pi_{\varphi_{DSi}}^{st}$ – весовой коэффициент и переменная числа состояний автомата a_i ;
- $\chi_{\varphi_{DXi}}^{st}$, $\pi_{\varphi_{DXi}}^{st}$ – весовой коэффициент и переменная числа символов входного алфавита автомата a_i ;
- $\chi_{\varphi_{DYi}}$, $\pi_{\varphi_{DYi}}^{st}$ – весовой коэффициент и переменная числа символов выходного алфавита автомата a_i ;
- $\chi_{\varphi_{DEi}}^{st}$, $\pi_{\varphi_{DEi}}^{st}$ – весовой коэффициент и переменная числа ошибок автомата a_i ;
- $\chi_{\varphi_{DCi}}^{st}$, $\pi_{\varphi_{DCi}}^{st}$ – весовой коэффициент и объединенная переменная-характеристика числа предшествующих рангов и компонентных автоматов входной подсети автомата a_i ;
- $\chi_{\varphi_{DVi}}^{st}$, $\pi_{\varphi_{DVi}}^{st}$ – весовой коэффициент и объединенная переменная-характеристика числа последующих рангов и компонентных автоматов выходной подсети автомата a_i .

Для динамической составляющей:

- $\chi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy}$, $\pi_{\varphi_{D\varphi_{vi}}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная полноты проверки ошибок тестового фрагмента tf_i ;
- $\chi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy}$, $\pi_{\varphi_{D\lambda_{ei}}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная длины тестового фрагмента tf_i ;
- $\chi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy}$, $\pi_{\varphi_{D\theta_{vi}}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная кратности тестового фрагмента tf_i ;
- $\chi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy}$, $\pi_{\varphi_{D\theta_{vei}}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная кратности популяции с тестовым фрагментом tf_i ;
- $\chi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy}$, $\pi_{\varphi_{D\rho_{ei}}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная реализуемости тестового фрагмента tf_i ;

– $\chi_{\varphi D \tau_{\rho i}}^{dy}$, $\pi_{\varphi D \tau_{\rho i}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная транспортируемости тестового фрагмента tf_i .

Для упрощения анализа многокритериальности в фитнес-функции может быть принят аддитивно-мультипликативный принцип оценки приоритета, как суммы взвешенных параметров, позволяющий выполнить ее скаляризацию, то есть привести оценку приоритета в одномерное пространство оптимизации. Вместе с тем, это не исключает возможности использования множества тех же взвешенных параметров в многомерном пространстве оптимизации.

С целью упрощения многокритериальность приоритета может быть понижена при некотором снижении качества оценки приоритета. В частности, тривиальные векторная и скалярная оценки директивного приоритета $\pi_{\varphi D i}^{Triv}$ тестового фрагмента tf_i может включать $\chi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy}$, $\pi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная полноты проверки ошибок, $\chi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy}$, $\pi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная длины, $\chi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy}$, $\pi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная кратности, $\chi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}$, $\pi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}$ – весовой коэффициент и переменная кратности популяции:

$$\pi_{\varphi D i}^{Vect \quad Triv} = (\chi_{\varphi D i}^{dy} (\chi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy}; 1/(\chi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy}); 1/(\chi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy}); 1/(\chi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy})). \quad (7)$$

$$\pi_{\varphi D i}^{Scal \quad Triv} = \chi_{\varphi D i}^{dy} (\chi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \varphi_{\nu i}}^{dy} + 1/(\chi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \lambda \varepsilon i}^{dy}) + 1/(\chi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \theta_{\nu i}}^{dy}) + 1/(\chi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\varphi D \theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy})). \quad (8)$$

Полная векторная, полная скалярная, тривиальная векторная, тривиальная скалярная фитнес-функции φ_i имеют соответственно вид:

$$\varphi_{ii}^{Vect} (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Vect})) = (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Vect})). \quad (9)$$

$$\varphi_{ii}^{Scal} (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Scal})) = (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i} + \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Scal})). \quad (10)$$

$$\varphi_{ii}^{Vect \quad Triv} (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Vect \quad Triv})) = (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Vect \quad Triv})). \quad (11)$$

$$\varphi_{ii}^{Scal \quad Triv} (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i}, \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Scal \quad Triv})) = (tf_i, (\chi_{\varphi R i} \cdot \pi_{\varphi R i} + \chi_{\varphi D i} \cdot \pi_{\varphi D i}^{Scal \quad Triv})). \quad (12)$$

Функция выбора σ_{ii} автомата a_{U_i} в качестве операндов принимает множество пар вида $(tf_i', \pi_{\sigma_{ii}}) \in Tf_i' \times \Pi_{\sigma_{ii}}$, расширенных тестовых фрагментов $tf_i' = (tf_i, \varphi_{U_i}, \lambda \varepsilon_i, \pi_{\sigma_{ii}})$ с добавленным внутренним многокритериальным приоритетом $\pi_{\sigma_{ii}}$ тестового фрагмента tf_i в векторной или скалярной форме, а также множество значений внешнего приоритета функции выбора σ_{ii} автомата a_{U_i} .

Во внешнем приоритете $\Pi_{\sigma_{ii}} = \Pi_{\sigma_{Ri}} \times \Pi_{\sigma_{Di}}$ функции выбора, по форме тождественном приоритету фитнес-функции φ_i и корректирующем при выборе его значения, присутствуют опционный псевдослучайный $\Pi_{\sigma_{Ri}}$ и директивный $\Pi_{\sigma_{Di}}$ компоненты. Опционный псевдослучайный приоритет $\pi_{\sigma_{Ri}} \in \Pi_{\sigma_{Ri}}$ в простейшем случае также представляется взвешенной псевдослучайной переменной $\pi_{\sigma_{Ri}} = \chi_{\sigma_{Ri}} \cdot \pi_{\sigma_{Ri}}$, где $\pi_{\sigma_{Ri}}$ – псевдослучайная переменная, весовой коэффициент $\chi_{\sigma_{Ri}}$ динамически определяется выбором для развития эволюции автомата a_i . Директивный приоритет $\pi_{\sigma_{Di}} \in \Pi_{\sigma_{Di}}$ выбора представляется вектором из взвешенных компонентов статической и динамической составляющих или скалярной взвешенной суммой статической и динамической составляющих в полной и сокращенной форме как для директивного приоритета фитнес-функции:

$$\pi_{\sigma_{Di}}^{Vect} = (\chi_{\sigma_{Di}}^{st} (\chi_{\sigma_{DSi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DSi}}^{st}; \chi_{\sigma_{DXi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DXi}}^{st}; 1/(\chi_{\sigma_{DYi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DYi}}^{st}); \chi_{\sigma_{DEi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DEi}}^{st}; 1/(\chi_{\sigma_{DCi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DCi}}^{st}); 1/(\chi_{\sigma_{DVi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DVi}}^{st})); \chi_{\sigma_{Di}}^{dy} (\chi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}}; 1/(\chi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy}); 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}}); 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}}); \chi_{\sigma_{D\rho \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\rho \varepsilon i}}^{dy}; \chi_{\sigma_{D\tau_{\rho i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\tau_{\rho i}}^{dy}})), \quad (13)$$

$$\pi_{\sigma_{Di}}^{Scal} = \chi_{\sigma_{Di}}^{st} (\chi_{\sigma_{DSi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DSi}}^{st} + \chi_{\sigma_{DXi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DXi}}^{st} + 1/(\chi_{\sigma_{DYi}} \cdot \pi_{\sigma_{DYi}}^{st}) + \chi_{\sigma_{DEi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DEi}}^{st} + 1/(\chi_{\sigma_{DCi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DCi}}^{st}) + 1/(\chi_{\sigma_{DVi}}^{st} \cdot \pi_{\sigma_{DVi}}^{st})) + \chi_{\sigma_{Di}}^{dy} (\chi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} + 1/(\chi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy}) + 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}}) + 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}}) + \chi_{\sigma_{D\rho \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\rho \varepsilon i}}^{dy} + \chi_{\sigma_{D\tau_{\rho i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\tau_{\rho i}}^{dy}}), \quad (14)$$

$$\pi_{\sigma_{Di}}^{Vect \quad Triv} = (\chi_{\sigma_{Di}}^{dy} (\chi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}}; 1/(\chi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy}); 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}}); 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}})). \quad (15)$$

$$\pi_{\sigma_{Di}}^{Triv} = \chi_{\sigma_{Di}}^{dy} (\chi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\varphi_{\nu i}}^{dy}} + 1/(\chi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy} \cdot \pi_{\sigma_{D\lambda \varepsilon i}}^{dy}) + 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu i}}^{dy}}) + 1/(\chi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}} \cdot \pi_{\sigma_{D\theta_{\nu \varepsilon i}}^{dy}})). \quad (16)$$

Пусть популяция фрагментов имеет вид множества $Tf_i' = \cup_{j \in J} tf_{ij}'$. Пусть функция $Max_{pr2, pr3} (\cup_{j \in J} (a, b, c)_j)$ выполняет поиск и выбор из множества троек мощности J такой тройки $(a, b, c)_j$, которая обладает максимальным значением по второму b и третьему c компонентам. Если компонент, например, c , в свою очередь является вектором $c = (c_1, c_2, \dots, c_k)$, то его максимальное значение c_{max} – вектор с максимальными составляющими $(c_{1max}, c_{2max}, \dots, c_{kmax})$, найденными в комплексно-параллельном или пошагово-последовательном просмотре, или, например, максимальный вектор во взвешенном позиционном представлении лексиграфического порядка (левые компоненты – старшие, правые компоненты – младшие).

Пусть $(\chi_{\varphi D ij} \cdot \pi_{\varphi D ij}^{Vect}) \times (\chi_{\sigma D ij} \cdot \pi_{\sigma D ij}^{Vect})$ – покомпонентное умножение векторов равной длины.

Полная векторная, полная скалярная, тривиальная векторная и тривиальная скалярная функции выбора φ_i имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{ii}^{Vect}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i', (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}, \chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect}))) &= \\ = \sigma_{ii}^{Vect}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} ((Tf_i, (\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}, \chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Vect})), & \\ (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}, \chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect}))) &= \\ = \text{Max}_{pr2, pr3}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i, ((\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}) \cdot (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}), & \\ (\chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Vect}) \times (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect})))) &= \\ = (Tf_i, ((\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij})_{max}, (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect})_{max})). & \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ii}^{Scal}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i', (\chi_{\sigma Ri} \cdot \pi_{\sigma Ri}, \chi_{\sigma Di} \cdot \pi_{\sigma Di}^{Scal}))) &= \\ = \sigma_{ii}^{Scal}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} ((Tf_i, (\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}, \chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Scal})), & \\ (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}, \chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Scal}))) &= \\ = \text{Max}_{pr2, pr3}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i, ((\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}) \cdot (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}), & \\ (\chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Scal}) \cdot (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Scal})))) &= \\ = (Tf_i, ((\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij})_{max}, (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Scal})_{max})). & \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ii}^{Vect Triv}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i', (\chi_{\sigma Ri} \cdot \pi_{\sigma Ri}, \chi_{\sigma Di} \cdot \pi_{\sigma Di}^{Vect Triv}))) &= \\ = \sigma_{ii}^{Vect Triv}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} ((Tf_i, (\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}, \chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Vect Triv})), & \\ (\chi_{\sigma Ri} \cdot \pi_{\sigma Ri}, \chi_{\sigma Di} \cdot \pi_{\sigma Di}^{Vect Triv}))) &= \\ = \text{Max}_{pr2, pr3}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i, ((\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}) \cdot (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}), & \\ (\chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Vect Triv}) \times (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect Triv})))) &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (Tf_i, ((\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij})_{max}, (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Vect Triv})_{max})). \quad (19) \\ \sigma_{ii}^{Scal Triv}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i', (\chi_{\sigma Ri} \cdot \pi_{\sigma Ri}, \chi_{\sigma Di} \cdot \pi_{\sigma Di}^{Scal Triv}))) &= \\ = \sigma_{ii}^{Scal Triv}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} ((Tf_i, (\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}, \chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Scal Triv})), & \\ (\chi_{\sigma Ri} \cdot \pi_{\sigma Ri}, \chi_{\sigma Di} \cdot \pi_{\sigma Di}^{Scal Triv}))) &= \\ = \text{Max}_{pr2, pr3}(\cup_{Tfij' \in Tf_i} (Tf_i, ((\chi_{\varphi Rij} \cdot \pi_{\varphi Rij}) \cdot (\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij}), & \\ (\chi_{\varphi Dij} \cdot \pi_{\varphi Dij}^{Scal Triv}) \cdot (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Scal Triv})))) &= \\ = (Tf_i, ((\chi_{\sigma Rij} \cdot \pi_{\sigma Rij})_{max}, (\chi_{\sigma Dij} \cdot \pi_{\sigma Dij}^{Scal Triv})_{max})). & \end{aligned} \quad (20)$$

Применение операций в методе

Эволюционно-генетический метод синтеза поведенческих тестов для компонентного автомата $a_i \in A$ РИС решает задачи: а) синтеза идентификаторов T_i для состояний S_i ; б) синтеза тестовых примитивов Tr_i в) определения связующих примитивов Lp_i ; г) синтеза тестовых фрагментов Tf_i .

Метод построения тестов на основе Te_i или Ce_i , включает стадии – препроцессорную, кроссинговерную и вложенную мутационную (см. рис. 1):

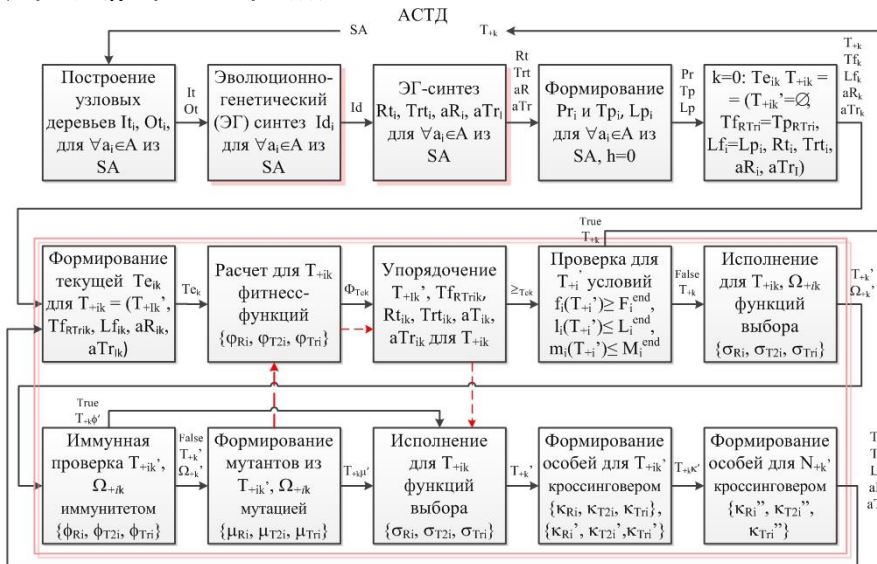


Рисунок 1 – Эволюционно-генетический метод синтеза поведенческих тестов

Фитнесс-функции на основе критериев полноты φ_i , длины $\lambda \varepsilon_i$ и кратности θ_i тестирования, определяют квазиупорядочение фрагментов Tf_i , Ω_f и завершение самих эволюций.

Эволюционный метод в большинстве случаев имеет меньшие значения затрат времени c_n на синтез поведенческих тестов при практически тех же значениях их длины и полноты, однако в худшем случае его верхние аналитические оценки сложности синтеза тестов совпадают с верхними оценками NP-сложного детерминированного метода при практически такой же их длине d :

$$\begin{aligned} c_n = Q(k(n_p/k)(4n_p/k+1)+3l+4) + (n_p/k+1)(3m+2) + & \\ + (2n_p/k(n_p/k-1)(n_p/k+1) + ((n_p/k+1)n_p/k)!) + & \\ + (2(2ml(n_p/k+1)n_p/k)^{nt/k} - 3 + (n_p/k-1)(n_p/k+ & \end{aligned}$$

$$+ 1)n_p/k!), \quad (20)$$

$$d = Q(k((n_p/k+1)+1)n_p/k(1.5n_p/k+2)) \quad (21)$$

где $n_p = |P|$, $n_t = |T|$, $n = |P| + |T|$, $m = |X|$, $l = |Y|$, k – коэффициент декомпозиции, Q – общий признак линейной зависимости (см. рис. 2).

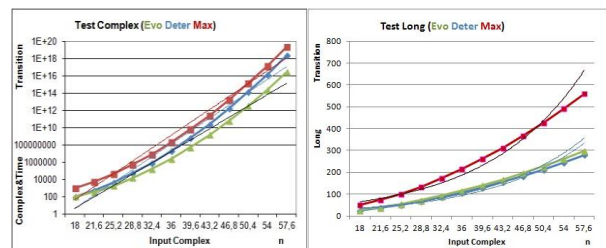


Рисунок 2 – Сложность и длина теста

По аналитическим оценкам и результатам опытной реализации для РИС средней сложности при сравнении с детерминированными методами метод синтеза тестов на основе эволюций требует меньших (до 85%) затрат времени при практическом сохранении длины тестов и полноты проверки.

Выводы

Представленная коэволюция тестовой и вирусной эволюций и в ее составе сигнатура операций для эволюционно-генетического метода синтеза поведенческих тестов компонентов РИС позволяет формировать тест, как популяцию тестовых фрагментов. Восстановление компонентного автомата РИС выполняется на основе идентификации, отождествления и детерминизации поведения опорных состояний, выполняемой в тестовых фрагментах. Развитие многоточечного кроссингвера и внешней мутации в условиях взаимодействия тестовой и вспомогательной вирусной эволюций уменьшило время развития тестовой популяции – время синтеза тестов, образующих покрытие тестовых примитивов.

Возможность ограничения ресурсов ЭС – числа особей и агрегаций, частной для особей и общей для популяции длины и кратности, параметры фитнес-функций и функций выбора, а также возможность останова эволюции при достижении определенных показателей полноты тестирования, длины и кратности популяции, времени ее синтеза обеспечивают завершение построения функциональных тестов.

Недостатком метода синтеза тестов на основе предложенной модели тестовой и вирусной эволюций остается сохранившаяся, хоть и уменьшенная в большинстве случаев, NP-сложность поведенческого тестового анализа, в частности, проявляющаяся в оценке его верхней границы.

Программно-алгоритмическая реализация сигнатуры операций в рамках эволюционного метода синтеза поведенческих тестов, выполненная для сервисов сетевого уровня протокольных реализаций в средствах РИС, подтвердила сокращение ресурсных затрат.

Литература

1. Bakker A.A. Wide-Area Distribution Network for Free Software / A.A. Bakker, M. Steen, A.S. Tanenbaum // *ACM Trans. on Internet Technology*, Vol. 6, Aug. 2006. – P. 259-281.
2. Praveen Ranjan Automated Software Testing Using Metahuristic Technique Based on An Ant Colony Optimization Electronic System Design (ISED) / Ranjan Praveen, Srivastava Km Baby // *International Symposium*, 20-22 Dec. 2010, Bhuba-

neswar. – P. 235-240.

Url:<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1106/1106.2686.pdf>

3. Stuart J. Russell Artificial Intelligence: a Modern Approach / Russell Stuart J. (Stuart Jonathan), and Peter Norvig // *Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey*, 2010. – 1095 p.

Url:<http://www.pearsonhighered.com/educator/product/Artificial-Intelligence-A-Modern-Approach/9780136042594.page>

4. Grindal Mats Handling Combinatorial Explosion in Software Testing / Mats Grindal // *Printed by LiU-Tryck, Linköping*, 2007. – 89 p.

Url:<http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:17568/FULLTEXT01.pdf>.

5. Мартынюк А.Н. Сетевые автоматные модели синтеза тестов / А.Н. Мартынюк // *Холодильна техніка і технологія*. – Одеса. Изд. Одеськ.Акад.Харч.Технолог. 2007. № 2(106). – С.94–97.

6. Скобцов Ю.А. Генетический алгоритм построения функциональных тестов арифметических устройств / Ю.А. Скобцов // *Информационно-управляющие системы. Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2/9 (68) 2014. – С. 9-13.

7. Снитюк В.Е. Аспекты эволюционного моделирования в задачах оптимизации / В.Е. Снитюк // *Искусственный интеллект*. – М.: Изд. Наука. 2005. № 4. – С. 284–291.

8. Poli Riccardo A Field Guide to Genetic Programming / Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee, John R. Koza // *Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 2.0 UK: England March 2008* – 250 p. Url:http://dces.essex.ac.uk/staff/rpoli/gp-field-guide/A_Field_Guide_to_Genetic_Programming.pdf.

9. Иванов, Д. Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих последовательностей цифровых устройств / Д. Е. Иванов // *Донецк, ДНТУ*, 2012. – 240 с.

10. Кудрявцев В.Б. Анализ поведения автоматов / В.Б. Кудрявцев, И.С. Грунский, В.А. Козловский // *Дискретная математика*. – М.: РАН, Отделение математических наук. Том 21, № 1. 2009. – С. 3-35.

11. Мартынюк О.М. Модель тестування еволюційної системи / О.М. Мартынюк, Г.С. Сугак, О.В. Дрозд // *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*. Чернівці, 2014. Т.5. Вип. 1. – С. 49-51.

12. Сугак А.С. Построение поведенческих тестов для недетерминированной временной автоматной модели / А.С. Сугак, А.Н. Мартынюк // *Электротехнические и компьютерные системы* № 17 (93), 2015. Одесса. – С. 63-68.

Получено 30.04.2016

References

1. Bakker A.A. Wide-Area Distribution Network for Free Software / A.A. Bakker, M. Steen, A.S. Tanenbaum // *ACM Trans. on Internet Technology*, Vol. 6, Aug. 2006. – P. 259-281.

2. Praveen Ranjan Automated Software Testing Using Metaheuristic Technique Based on An Ant Colony Optimization Electronic System Design (ISED) / Ranjan Praveen, Srivastava Km Baby // *International Symposium*, 20-22 Dec. 2010, Bhubaneswar. – P. 235-240.

Url: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1106/1106.2686.pdf>

3. Stuart J. Russell Artificial Intelligence: a Modern Approach / Russell Stuart J. (Stuart Jonathan), and Peter Norvig // *Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey*, 2010. – 1095 p.

<http://www.pearsonhighered.com/educator/product/Artificial-Intelligence-A-Modern-Approach/9780136042594.page>

4. Grindal Mats Handling Combinatorial Explosion in Software Testing / Mats Grindal // *Printed by LiU-Tryck, Linköping*. 2007. – 89 p.
<http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:17568/FULLTEXT01.pdf>.

5. Martynyuk A.N. Setevye avtomatnye modeli sinteza testov [Network Automata Models for Test Synthesis] / A.N. Martynyuk // *Kholodil'na Tekhnika I Tekhnologiya*, – Odesa. Isd. Odesk.Akad.Harch.Tehnolog. 2007. No2(106). – P.94 – 97 (In Russian).

6. Skobtsov Y.A. Genetichesky algoritm postroeniya funktsionalnih testov arifmeticheskikh ustroystv [Genetic Algorithm of building of functional tests for arithmetic devises] / Y.A. Skobtsov // *Informatsionno-upravlyayushchie sistmy. Vostochno-Evropeyskiy journal peredovih technology*, - 2/9 (68) 2014. – С. 9-13 (In Russian).

7. Snityuk V.E. Aspekty evolyutsionnogo modelirovaniya v zadachakh optimizatsii [Aspects of evolutionary modeling in optimization problems] / V.E. Snityuk // *Iskusstvennyi Intellekt. – Nauka Publ.*, Moskva, Isd. Nauka. 2005. No4. – pp. 284 – 291 (In Russian).

8. Poli Riccardo A Field Guide to Genetic Programming / Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee, John R. Koza // *Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 2.0 UK: England March 2008* – 250 p.

Url: http://dces.essex.ac.uk/staff/rpoli/gp-field-guide/A_Field_Guide_to_Genetic_Programming.pdf.

9. Ivanov D.E. Geneticheskie algoritmi postroeniya vhodnih identifitsiruyuschih posledovatel'nostei tsifrovih ustroystv [Genetic Algorithms of building of identifier sequences for digital circuits] / D.E. Ivanov // *Donetsk, DNTU*, 2012. – 240 p (In Russian).

10. Kudryavtsev V.B. Analiz Povedeniya Avtomatov [Automata Behavior Analysis] / V.B. Kudryavtsev, I.S. Grunskii, V.A. Kozlovskii // *Diskretnaya Matematika*, Moskva. RAN, Otdelenie Matematicheskikh Nauk. Tom 21, No1. 2009. P.3-35. (In Russian).

11. Martynyuk A.N. Model' testuvannja evoljucijnoi systemy [Model of Testing for Evolution System] / A.N. Martynyuk, A.S. Sugak, A.V. Drozd // *Naukovyj Visnyk Chernivc'kogo Nacional'nogo Universytetu, Vipusk "Komp'yuterni systemy ta komponenty"* – Tom 5, Vip. 1. – Chernivtzi. Vidavn. Chen.Natz.Univ.– 2014. – P.40-51 (In Ukrainian).

12. Sugak H.S. Postroenie povedencheskikh testov dlya nedeterminirovannoy vremennoy avtomatnoy modeli [Building of behavioral tests for nondeterministic time automata model] / H.S. Sugak, O.N. Martynyuk // *Electrotechnicheskie i computernie sistemy* № 17 (93), 2015. Odessa. – P. 63-68.



Мартынюк
Александр Николаевич,
канд. техн. наук, доцент каф.
Компьютерных
интеллектуальных систем и
сетей Одесского нац.
политехн. ун-та.
тел.: +38(067) 489-81-69
E-mail:
anmartynyuk@ukr.net



Сугак
Анна Сергеевна;
ассистент кафедры Компьюте-
ризованных систем управле-
ния Одесского национального
политехнического университета
тел.: +38(093) 705-15-93
E-mail:
sygak.anna@mail.ru



Хабиб
Альшикх;
аспирант кафедры Компьютер-
ных интеллектуальных систем и
сетей Одесского национального
политехнического университета
тел.: +38(093) 074-95-34
E-mail:
begwnoo22@yahoo.com