

УДК 621.396.41

**И.А. Кречетов, В.В. Кручинин**

## Об одном алгоритме адаптивного обучения на основе кривой забывания

Предлагается алгоритм, основанный на принципах итеративного обучения и модульного представлении информации. Алгоритм ориентирован на нахождение наиболее эффективной траектории обучения, с учетом забывания информации обучаемым в процессе освоения образовательного контента.

**Ключевые слова:** компетенция, адаптивное обучение, генетический алгоритм, электронное образование, итеративное обучение, кривая забывания.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-1-75-80

Одним из перспективных направлений развития электронного обучения в мире является адаптивное обучение. Под адаптивным понимается обучение, учитывающее индивидуальные характеристики, потребности и способности обучаемого. Одним из вариантов реализации адаптивного обучения, набирающим популярность в настоящее время, является подход, при котором обучаемый работает с адаптивным контентом, в общем случае – с электронным курсом, содержание которого изменяется в зависимости от успешности его прохождения.

Подобный подход возможно реализовать, если образовательный контент представлен модулями – элементарными (неделимыми) фрагментами контента. Особенностью такого представления учебной информации является то, что имея в наличии необходимые алгоритмы и технологии, основанные на применении базы образовательных модулей (базы знаний), покрывающих некоторую дисциплину или область знаний, представляется возможным:

- генерировать уникальные курсы для обучаемых, учитывающие их текущие знания и способности к обучению;
- осуществлять повторение только забытого материала, без необходимости прохождения всего курса заново;
- производить анализ прохождения обучаемым электронного курса и своевременно вносить корректировки в процесс обучения.

Адаптивное обучение, основанное на применении адаптивного контента в общем и использовании элементарных неделимых фрагментов (модулей) в частности, рассматривается многими исследователями. Одними из наиболее продвинутых в данной теме отечественными авторами можно считать Л.А. Растрогина, И.П. Норенкова, Н.К. Соколова, М.Ю. Уварова [1–4]. Реальным воплощением идей адаптивного обучения можно считать зарубежную компанию Knewton, внедрившую свои программные решения в образовательные процессы многих учебных заведений [5].

Однако при наличии общих принципов представления образовательного контента в виде базы модулей актуальной является задача нахождения оптимальных маршрутов обучения, разработки ал-

горитмов и методик управления процессом обучения. Настоящая статья является развитием идей, связанных с технологией адаптивного обучения, впервые представленных в работе [6].

### Основные термины и определения

**Модуль** – логически завершенная минимальная единица информации образовательного характера, которая раскрывает одно или несколько терминов или понятий и находится в связи с другими единицами. Модуль может быть представлен текстом, содержать графику, видео или аудио, а также любые иные интерактивные формы представления информации. Основными характеристиками модуля являются:

- 1) время, отведенное на освоение модуля;
- 2) входные субкомпетенции;
- 3) выходные субкомпетенции;
- 4) возможные уровни освоения субкомпетенций.

Входные субкомпетенции определяют необходимость наличия у обучаемого требуемых знаний и умений для освоения модуля, а выходные субкомпетенции, в свою очередь, определяют результат освоения модуля. Возможный уровень освоения субкомпетенций представляет собой величину, характеризующую степень освоения тех или иных выходных субкомпетенций при работе обучаемого с модулем. Выходные субкомпетенции одного модуля могут являться входными субкомпетенциями другого. Чтобы полнее представлять суть входных и выходных субкомпетенций, целесообразно ознакомиться с понятиями «компетенция» и «субкомпетенция».

**Компетенция.** Термин «компетенция» имеет множество вариаций определений под разные сферы применения. В образовании часто можно встретить определение: компетенция включает совокупность взаимосвязанных качеств личности (знаний, умений, навыков, способов деятельности), задаваемых по отношению к определенному кругу предметов и процессов и необходимых для качественной продуктивной деятельности по отношению к ним [7]. В рамках настоящей статьи в качестве определения термина «компетенция» будет принято определение ФГОС третьего поколения, где компетенция – способность применять знания, умения и личностные качества для успешной деятельности в определенной области.

Стоит также отметить наличие в упомянутом стандарте понятия «результат обучения», означающее «усвоенные знания, умения и освоенные компетенции». Введем аналогичный термин «результат освоения модуля», под которым будем понимать совокупность выходных субкомпетенций.

**Субкомпетенция** – составной элемент компетенции нижнего уровня. Например, компетенция «способность работать с современным программным обеспечением» может быть представлена требованием «владеть пакетом офисных программных средств» и «знать основные принципы графических интерфейсов». В свою очередь требования «владеть» и «знать» могут быть разбиты на более мелкие составные части, а те в свою очередь – на еще более мелкие. В результате одна компетенция может быть представлена деревом навыков, умений, владений, знаний. Листья такого дерева и будут являться субкомпетенциями.

Как уже было отмечено выше, модуль может иметь входные и выходные субкомпетенции. Если в качестве модуля рассмотреть инструкцию пользования телевизором, то можно сказать, что одной из входных субкомпетенций такого модуля будет являться «уметь пользоваться домашней розеткой», а одной из выходных – «уметь переключать каналы телевизионного вещания».

Чтобы оценить результаты освоения модуля и обучения в целом, целесообразно измерять *уровень знаний субкомпетенций* – будем называть так величину, характеризующую объем владения обучаемым той или иной рассматриваемой субкомпетенцией.

**Траектория обучения** – последовательность проходимых обучаемым модулей.

#### Модель предметной области

Обозначим:  $K$  – множество субкомпетенций курса;  $M$  – множество образовательных модулей курса;  $G = \{M, K\}$  – двудольный граф, образующийся из вершин модулей  $M_{i,j \in [1;n]}$  (круги) и вершин субкомпетенций  $K_{j,k \in [1;m]}$  (прямоугольники), где  $M_i$  – модуль множества  $M$ ,  $K_j$  – субкомпетенция множества  $K$ , являющаяся одновременно выходной для некоторого  $M_i$  и входной для некоторого  $M_{k,k \in [1;n]}$ ,  $n$  – количество модулей,  $m$  – количество компетенций. Пример такого графа представлен на рис. 1.

$T$  – множество тестов, предназначенных для оценки знаний субкомпетенций  $K$ .

Модуль  $M_i$  может иметь несколько как входных, так и выходных субкомпетенций. Выходную субкомпетенцию  $K_j$  модуля  $M_i$ , не являющуюся входной ни для одного другого модуля, будем называть висячей субкомпетенцией. Стоит отметить, что на практике возможны ситуации, когда некоторый модуль  $M_i$  будет иметь нереализованный вход (в множестве  $M$  отсутствует модуль, выходные компетенции которого являются входными для  $M_i$ ), одна-

ко такие случаи являются допустимыми и не ставят под сомнение концепцию представления некоторой области знаний в виде сети модулей.

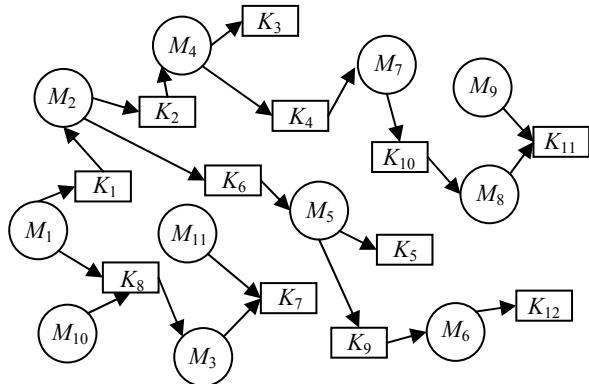


Рис. 1. Граф образовательных модулей

Адаптивный алгоритм обучения основан на учете естественного процесса забывания информации человеком во времени, который математически может быть описан как

$$R(t) = e^{-s/t}, \quad (1)$$

где  $R$  – объем остаточных знаний;  $s$  – индивидуальный для каждого человека параметр, характеризующий скорость забывания информации.

Выражение (1) получил Герман Эббингауз [8], показав в своих исследованиях, что чем больше проходит времени с момента приобретения человеком информации, тем её меньше в экспоненциальной зависимости остается в памяти.

Исследования показывают [8], что в среднем человек через 24 ч забывает 60–70% принятой информации, а через месяц остаточный уровень знаний составляет 20% от первоначального. Известной методикой фиксации знаний на требуемом уровне является итеративное обучение, которое предполагает многократное повторение изученного материала для его закрепления в долговременной памяти. Предположим, что студенту было предложено освоить некоторый объем информации, с чем он успешно справился. Далее в течение нескольких дней студент произвел несколько раз повторение изученного материала. На рис. 2 пунктирной линией показано, как протекал бы процесс забывания информации у студента, если бы он завершил обучение. Однако, повторяя материал, студент каждый раз поднимал свой уровень знаний, зафиксировав свои знания к концу недели на высоком уровне.

В данном примере был рассмотрен обобщенный сценарий процесса обучения студента. Очевидно, что приобретение и забывание информации – сложные умственные процессы, результат влияния на которые в настоящее время невозможно спрогнозировать с предельной точностью. Однако в целом неоспоримым является эффект, которого можно достичь за счет итеративного обучения, а именно – зафиксировать знания обучаемого к концу обучения на требуемом уровне. Так, в работе [9] авторы рассмат-

ридают разработку вероятностной модели принципа повторений и выводят формулу обобщенной функции забывания, сформированной в результате произвольного числа циклов обучения.



Рис. 2. Кривая забывания при итеративном обучении

Рассмотрим, как методика итеративного обучения ложится в основу алгоритма адаптивного обучения.

В общем случае адаптивные технологии обучения ориентированы на получение таких знаний о студенте, которые бы позволили строить для него наиболее эффективную с точки зрения обучения траекторию. В рамках идеи, которая рассматривается в настоящей статье, таким знанием является кривая забывания, описываемая законом (1), – в процессе обучения студента алгоритм должен найти для этого студента такую  $s$ , которая позволит производить прогноз остаточного уровня его знаний во времени без применения практических измерений (тестирования) и своевременно производить необходимые действия по поддержанию знаний студента на требуемом уровне. В свою очередь, имея теоретическое представление о характере кривой забывания студента, представляется возможным за несколько этапов практических измерений знаний произвести идентификацию модели забывания, что позволит автоматически включать в траекторию обучения студента модули, ориентированные на восполнение утраченных (забытых) знаний.

Траектория обучения студента представляет собой ориентированный граф-путь  $P$  графа  $G$ , который определяет последовательность прохождения образовательных модулей. Вопрос нахождения  $P$  рассматривался авторами в работе [6], где предлагался способ генерации для обучаемого индивидуального образовательного контента на весь период обучения на основе применения генетического алгоритма. Подход получения статичного контента применим в некоторых частных случаях, когда имеет место необходимость обеспечить студентов материалами в условиях невозможности оценивания уровня знаний на каком-либо этапе обучения, при этом получаемые материалы с некоторой точностью будут соответствовать индивидуальным характеристикам студентов. В рамках настоящей статьи рассматривается алго-

ритм, ориентированный на интеграцию в системы дистанционного обучения и позволяющий предъявлять студенту учебные модули в зависимости от изменения модели обучаемого в процессе обучения в курсе.

Под моделью обучаемого будем понимать множество  $S = \{R_{K_j, j \in [1; m]}\}$ , где  $R_{K_j} = \{R_{TK_j}, R_{PK_j}, R_{AK_j}\}$  – множество уровней знаний субкомпетенций;  $R_{TK_j}$  – множество значений уровней  $j$ -й субкомпетенции, рассчитанных теоретически;  $R_{PK_j}$  – множество значений уровней  $j$ -й субкомпетенций, полученных при тестировании;  $R_{AK_j}$  – множество, элементы которого принимают значения элементов  $R_{TK_j}$  или  $R_{PK_j}$  в зависимости от того, результат какого из способов оценки уровня знаний (теоретического или практического) целесообразно принимать за действительный уровень знаний студента по субкомпетенции  $K_j$  в конкретный момент времени.

Элементы множеств  $R_{PK_j}$  и  $R_{TK_j}$  отражают значения уровня знаний субкомпетенций в моменты перед очередным предъявлением того или иного модуля.

Под *изменением модели обучаемого* будем понимать каждое появление в множестве  $R_{AK_j}$  элемента со значением, отличным от значения предыдущего элемента.

#### Алгоритм адаптивного обучения

Рассмотрим общий принцип реализации адаптивного обучения, представленного на рис. 3 в виде блок-схемы.

1. Первым действием на пути к предъявлению модуля является *формирование выборки*. Данный блок осуществляет операцию формирования из множества  $M$  некоторого множества модулей  $A$ , участвующего в построении граф-пути  $P$  и содержащего только такие модули, выходные субкомпетенции которых не освоены студентом либо их уровень знаний ниже нормы.

2. На основе множества  $A$  производится поиск граф-пути  $P$  с помощью алгоритма, приведенного в [6].

3. Производится предъявление первого элемента  $P$ . Из алгоритма видно, что студенту всегда предъявляется только первый элемент граф-пути  $P$ . Это обусловлено тем, что к моменту очередного нахождения  $P$  множество  $A$  содержит только те модули, которые студенту необходимо освоить. Так как  $P$  является упорядоченным множеством модулей, то при переходе студента от изученного модуля к новому новый будет всегда являться первым элементом  $P$ .

4. По окончании освоения модуля производится оценка уровня знаний приобретенных субкомпетенций при помощи тестирования (предъявляется тест из множества  $T$ ), в результате которого получается элемент множества  $R_{PK_j}$ .

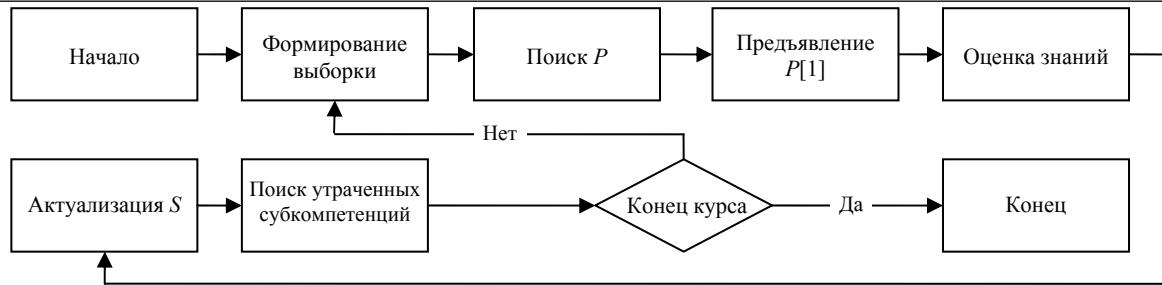


Рис. 3. Общая блок-схема алгоритма адаптивного обучения

5. После тестирования наступает момент, когда студенту нужно перейти к следующему модулю. Для того чтобы система смогла использовать данные о текущем состоянии модели обучаемого  $S$ , необходимо произвести её *актуализацию* – определить элемент множества  $R_{AK_j}$ , характеризующий уровень знаний по субкомпетенциям в текущий момент времени.

6. Производится поиск утраченных (забытых) компетенций.

7. Определяется момент времени, в котором находится студент относительно периода, отведенного на освоение курса. Алгоритм заканчивает процесс обучения, если время вышло или возвращается к этапу формирования выборки.

Далее рассмотрим некоторые этапы алгоритма более подробно.

*Формирование выборки.* Как уже было отмечено ранее, алгоритм должен быть отзывчив к изменениям показателей уровней знаний студента по субкомпетенциям, а именно в моменты, когда изменение модели студента отражает спад знаний. Следовательно, при каждом появлении во множестве  $R_{AK_j}$

элемента со значением ниже нормы, система в ближайшем предъявлении должна обеспечить повышение уровня знаний по рассматриваемой субкомпетенции. Рассмотрим алгоритм формирования выборки, представленный в виде блок-схемы на рис. 4.

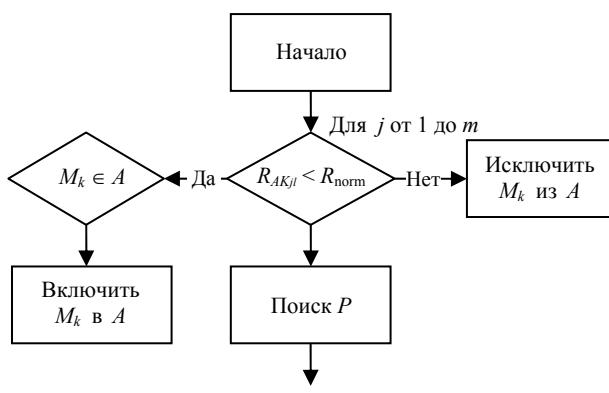


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования выборки

Пусть  $M_k$  – модуль, реализующий компетенцию  $K_j$ . Обозначим  $A$  – множество модулей, реализующих такие субкомпетенции, для которых значе-

ние  $R_{AK_{jl}}$  – последнего элемента множества  $R_{AK_j}$  – меньше  $R_{norm}$ , где  $R_{norm}$  – значение удовлетворительного объема знаний по субкомпетенции  $K_j$ . В моменты, когда студент успешно осваивает субкомпетенцию ( $R_{AK_{jl}} > R_{norm}$ ), соответствующий модуль считается освоенным и исключается из  $A$  для того, чтобы он не участвовал в очередном предъявлении. И наоборот – в процессе забывания настанет момент когда  $R_{AK_{jl}} < R_{norm}$ , при этом соответствующий модуль будет включен в  $A$ . Таким образом, множество  $A$  будет формироваться только из тех модулей, которые необходимо предъявить.

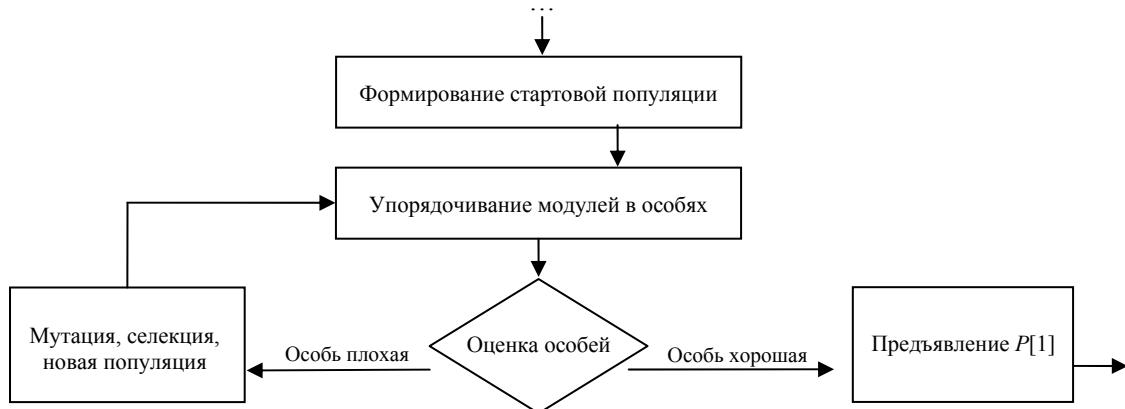
*Поиск граф-пути  $P$ .* Определим критерии, которым должен удовлетворять  $P$ . Обозначим  $G_A = \{A, K_A\}$  – граф модулей, образующийся из вершин  $M_{a,a \in [1;n]}$  и  $K_{j,j \in [1;m]}$ , где  $M_i$  – модуль множества  $M$ ,  $K_j$  – субкомпетенция множества  $K$ , являющаяся одновременно выходной для некоторого  $M_i$  и входной для некоторого  $M_{k,k \in [1;n]}$ ,  $n$  – количество модулей,  $m$  – количество компетенций.

Среди всех возможных путей, полученных из  $A$ , граф-путь  $P$  должен:

- являться самым коротким;
- обеспечивать лучшие показатели уровня знаний целевых субкомпетенций на момент окончания изучения курса.

Поиск  $P$ , удовлетворяющего обозначенным критериям, является поисковой задачей, решение которой представляется возможным путем реализации генетического алгоритма [6] (рис. 5).

*Актуализация модели обучаемого  $S$ .* Практическое измерение знаний студента производится путем прохождения тестирования, результаты которого фиксируются в модели обучаемого, т.е. формируется новый элемент множества  $R_{PK_j}$  для каждой выходной субкомпетенции модуля. Ввиду того, что действительный уровень знаний студента по субкомпетенциям в конкретные моменты времени отвечают элементы множества  $R_{AK_j}$ , то в момент после освоения нового модуля и прохождения соответствующего тестирования формируется также новый элемент  $R_{AK_j}$ , имеющий значение только что зафиксированного элемента множества  $R_{PK_j}$ .

Рис. 5. Блок-схема алгоритма нахождения пути  $P$ 

Поскольку время обучения студента в курсе конечно, далее определяется момент времени относительно продолжительности курса. Если срок обучения подошел к концу, алгоритм завершает свое выполнение. Если нет – производится оценка текущего состояния уровня знаний по всем субкомпетенциям курса ( поиск утраченных знаний). Вероятны ситуации, когда студент завершит обучение досрочно, т.е. уровень знаний по всем субкомпетенциям будет находиться в границах нормы, а времени до окончания курса будет достаточно, чтобы освоить еще какие-либо модули. В этом случае принимать решение о том, как должна действовать обучающая система, следует исходя из задач обучения и конкретных условий, в которых находится обучаемый. Система может как завершить обучение по курсу, так и поддерживать уровень знаний студента до требуемого, предлагая ему освоить ранее изученный материал в определенные моменты времени (когда начнут действовать процессы забывания).

**Поиск утраченных компетенций** (рис. 6). Чтобы произвести вывод следующего модуля, алгоритму необходимо произвести оценку текущих уровней знаний студента. Если для каждой  $R_{AK_j}$  последний элемент выше нормы, то, как уже было отмечено выше, алгоритм может завершить обучение. Понятно, что до тех пор, пока студенту не были предъявлены все требуемые модули, будут существовать такие  $R_{AK_j}$ , у которых последний элемент множества будет равен нулю, т.е. алгоритм продолжит обучение. Чтобы учитывать при построении маршрута обучения те компетенции, по которым произошло забывание знаний, необходимо произвести теоретическую оценку знаний приобретенных ранее компетенций, т.е. вычислить  $R_{TK_j}$  согласно (1). Если для каждой компетенции последний элемент  $R_{TK_j}$  будет выше нормы (т.е. забывания не произошло), то алгоритм продолжает свою работу, возвращаясь к этапу формирования выборки.

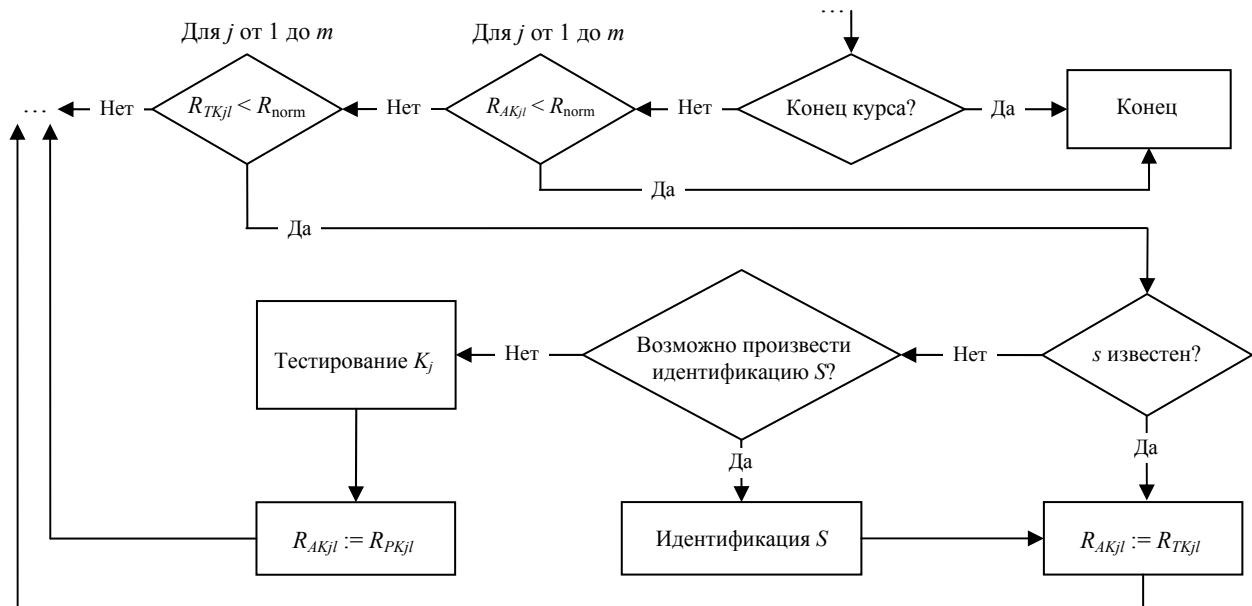


Рис. 6. Блок-схема алгоритма поиска утраченных знаний

Если последний элемент  $R_{TK_j}$  меньше нормы, то следует установить – получен ли параметр  $s$  для рассматриваемой компетенции. Если  $s$  известно, то по рассчитанному значению производится фиксирование текущего уровня знаний по компетенции в  $R_{AK_j}$ . Если  $s$  неизвестно, то на основе данных множеств  $R_{TK_j}$  и  $R_{PK_j}$  за последние фиксации уровней знаний производится идентификация параметра  $s$ . При этом если этого требует идентификация, алгоритм запускает тестирование на оценку уровня знаний рассматриваемой (забытой) компетенции. Здесь также стоит отметить, что наиболее достоверной оценкой уровня знаний студента является его практическое измерение, а не теоретический расчет, соответственно в моменты после прохождения тестирования последний элемент множества  $R_{AK_j}$  будет всегда принимать значения  $R_{PK_j}$ .

### Выводы

1. Алгоритм позволяет поддерживать знания студента на требуемом уровне за счет отслеживания процесса забывания освоенных субкомпетенций и реакции на случаи, когда знания по ним упали до уровня ниже нормы.

2. Для каждого обучаемого траектория обучения будет уникальной и зависеть от результатов прохождения модулей.

3. Алгоритм может быть настроен под разные задачи обучения, например: за минимально время обеспечить обучаемого требуемым уровнем знаний или за заданное время обеспечить обучаемого знаниями максимального уровня.

4. В текущей форме реализации алгоритм не учитывает переход информации из кратковременной памяти обучаемого в долговременную, что может являться дальнейшей исследовательской работой над алгоритмом.

### Литература

1. Растрогин Л.А. Адаптивное обучение с моделью обучаемого / Л.А. Растрогин, М.Х. Эренштейн. – Рига: Зинатне, 1988. – 160 с.
2. Норенков И.П. База и генератор образовательных ресурсов // И.П. Норенков, М.Ю. Уваров // Информационные технологии. – 2005. – № 9. – С. 60–66.
3. Норенков И.П. Адаптивные среды создания образовательных ресурсов / И.П. Норенков, Н.К. Соколов, М.Ю. Уваров, МГТУ им. Н.Э. Баумана // Наука и образо-

вание. Электронный журнал. – 2009. – № 3. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/115688.html> (дата обращения: 27.02.2017).

4. Норенков И.П. Синтез индивидуальных маршрутов обучения в онтологических обучающих системах / И.П. Норенков, Н.К. Соколов // Информационные технологии. – 2009. – № 3. – С. 74–77.

5. Knewton, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.knewton.com> (дата обращения: 20.01.2017).

6. Кречетов И.А. Применение онтологического подхода в технологии разработки образовательного контента / И.А. Кречетов, В.В. Кручинин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 322–325.

7. Шадрина Е.В. О «компетенции» и «компетентности» в образовании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.niro.nnov.ru/?id=980> (дата обращения: 19.01.2017)

8. Ebbinghaus H. Memory: a contribution to experimental psychology (H.A. Ruger, C.E. Bussenius). Originally published in New York by Teachers college, Columbia University, 1913 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.org/stream/memorycontribute00ebbiuoft> (дата обращения: 17.03.2017).

9. Буймов А.Г. Вероятностная модель эффекта повторений в обучении / А.Г. Буймов, Б.А. Буймов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 236–242.

---

### Кречетов Иван Анатольевич

Зав. лаб. инструментальных систем моделирования и обучения ТУСУРа  
Тел.: +7-923-413-22-43  
Эл. почта: [kia@2i.tusur.ru](mailto:kia@2i.tusur.ru)

### Кручинин Владимир Викторович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ПМиИ ТУСУРа  
Тел.: +7-913-886-04-44  
Эл. почта: [kru@2i.tusur.ru](mailto:kru@2i.tusur.ru)

Krechetov I.A., Kruchinin V.V.

### About one algorithm of adaptive learning based on forgetting curve

The algorithm is based on the principles of iterative learning and modular content representation. The algorithm is aimed to find the most efficient path of study, based on forgetting information when learning.

**Keywords:** competence, adaptive learning, genetic algorithm, e-learning, iterative learning, forgetting curve.