

УДК 681.3:371.315.7

М.С. Шибут

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРСРЕДЫ

Предлагается модель процесса автоматизированного обучения, включающая средства формализации предметных знаний и навигации в учебной гиперсреде и обеспечивающая адаптацию сценариев обучения и контроля знаний к логической зависимости кадров учебной гиперсреды, к уровню знаний обучаемого и к дидактическому образу состояния его знаний. Адаптивный сценарий обучения содержит избыточную последовательность кадров, которые необходимо изучить, с учетом имеющихся знаний и целей обучения.

Введение

В современных условиях наблюдается бурное развитие средств автоматизации процесса обучения. Анализ состояния разработок в области автоматизированного обучения [1, 2] показал, что наиболее востребованными являются педагогически-ориентированные интеллектуальные обучающие системы (ИОС) декларативного типа. ИОС данного типа предназначены для поддержки учебно-познавательной деятельности и опираются на педагогические методики как в организации адаптивного автоматизированного обучения, так и в подготовке учебных материалов, обеспечивают приобретение и использование дидактических знаний об учебном курсе.

В последнее время среди декларативных ИОС наибольшее распространение получили адаптивные учебные гиперсреды (АУГС), которые обеспечивают простоту формирования модели предметной области при создании учебного курса и основы для реализации адаптации к обучаемому. Адаптивность позволяет оптимизировать процесс обучения по времени за счет сокращения объема предъявляемой теоретической информации и количества тестовых заданий без потери качества обучения. В связи с этим актуальна задача создания специализированной гипертекстовой ИОС, которая осуществляет динамическую адаптацию структуры и содержания учебного курса к состоянию знаний обучаемого, согласуемую с традиционными педагогическими методиками автоматизированного обучения.

В самом общем виде гиперсреда представляется множеством гипертекстовых статей – кадров, между которыми существуют гиперссылки, реализующие гипертекстовые связи, и используется свободный порядок навигации – переходов по этим связям. Последовательность изучения кадров при навигации в учебной гиперсреде будем называть сценарием обучения. Основная проблема использования гиперсреды в обучении состоит в необходимости соблюдения логики изложения материала, что предполагает определенный порядок следования кадров сценария. В то же время требуется сохранить вариативность изложения, которая является одним из главных преимуществ гиперсреды.

С целью решения указанной проблемы в статье предлагается формализация структуры гиперсреды путем дифференциации кадров и связей между ними в зависимости от их дидактического статуса и от особенностей применения в процессе обучения. На основе формализации структуры гиперсреды построены модели навигации в гиперсреде, адаптивной к логической зависимости вершин, к уровню знаний обучаемого и к дидактическому образу состояния знаний обучаемого.

1. Адаптивные методы управления обучением в ИОС

Выделим две группы ИОС по используемой парадигме: экспертно-обучающие системы (ЭОС) и адаптивные учебные гиперсреды. Рассмотрим особенности методов адаптивного управления обучением в системах каждой группы.

ЭОС используют методологию инженерии знаний и экспертных систем для создания моделей объяснений, сложных моделей обучаемого и реализации на их основе интеллектуальных технологий формирования модели предметной области, стратегий обучения и оценки знаний. Современные ЭОС осуществляют адаптацию к модели обучаемого, допуская изменение не только уровня и типа обучающего воздействия, но и цели обучения в некотором заданном диапазоне. Модель обучаемого в большинстве ЭОС представлена детальной моделью его текущего состояния знаний и целевого состояния знаний после обучения.

Адаптация в ЭОС основана на применении процедур логического вывода и направлена на отбор и логическое упорядочение информационных фрагментов, удовлетворяющих предварительным требованиям к знаниям обучаемого и обеспечивающих подходящую для него познавательную нагрузку и уровень изложения. Изменения в модели обучаемого используются в качестве обратной связи в процессе адаптивного управления обучением, что позволяет гибко учитывать изменения уровня подготовки и объема знаний обучаемого. Однако практическое использование ЭОС педагогами затруднено ввиду сложности технологий формирования сценария обучения, основанных на правилах логического вывода, что требует подготовки в области инженерии знаний.

АУГС – это интеллектуализированная гипермедиа-система, которая может менять различные внешние аспекты своего поведения, адаптируясь к изменениям модели обучаемого. В гипертекстовых средах для обучения используются основные функции гипертекста – информационный поиск и навигация. Поиск в гипертексте основан на индексировании – описании семантики документа множеством ключевых слов, а навигация – на использовании гиперссылок, отражающих смысловые связи и облегчающих восприятие и просмотр содержимого гипертекста пользователем. Модель обучаемого в адаптивной гиперсреде задается в виде множества ключевых понятий и их взаимосвязей, присутствующих в изученных документах (рассматриваемых как предположительные результаты обучения) и в поисковых запросах, составленных обучаемым (цели обучения).

Адаптация в АУГС состоит в отборе учебной информации и гиперсвязей, релевантных модели обучаемого. Выделяют два метода адаптации в гиперсреде [3]: адаптацию на уровне содержания, называемую адаптивным представлением, и адаптацию на уровне гипертекстовых ссылок – адаптивную поддержку навигации. Данные методы направлены на изменение отображаемой информации, ее содержания или состава гиперссылок в зависимости от текущей модели обучаемого. Обучение осуществляется путем навигации с использованием отображенных гиперссылок в свободном, методически не обоснованном порядке.

АУГС обеспечивает компромисс между простотой формирования и модификации модели предметных знаний и адекватностью этой модели механизмам памяти и процессам создания текстовых документов путем упорядочения и структуризации сети идей. Преимуществами гиперсреды являются ее нелинейность и вариативность. В качестве недостатков выделим низкий уровень интерактивности и индивидуализации по сравнению с ЭОС, поскольку используются упрощенные модели обучаемого и стратегий обучения. Гипертекстовое представление больше ориентировано на получение справочной информации, чем на обучение. Обучение же требует изложения материала в логической последовательности, а следовательно, и закрепления порядка просмотра кадров.

Для реализации учебной гиперсреды, поддерживающей динамическую методически обоснованную адаптацию к модели обучаемого, возможно совершенствование адаптивных учебных гиперсред путем совместного использования в одной программной среде методов представления и обработки знаний для решения задач управления обучением с обратной связью и технологии гипертекста для описания структуры учебной информации и организации процесса ее изучения.

2. Модель адаптивного процесса обучения

Управление обучением заключается в циклическом повторении следующих шагов. Инициализируется модель обучаемого, на ее основе строится сценарий обучения, обучаемый полу-

чает очередную порцию теоретической информации или контрольное задание в соответствии с этим сценарием, система оценивает реакцию обучаемого на полученное воздействие, по результатам оценки актуализируется модель обучаемого путем изменения текущих значений его характеристик, затем в случае несоответствия этих характеристик ожидаемым значениям принимается решение о необходимости адаптации и сценарий корректируется с учетом изменения этой модели, иначе продолжается обучение по текущему сценарию.

Построим модель адаптивного процесса обучения как процесса автоматического управления с обратной связью предъявлением обучаемому кадров гиперсреды (рис. 1). В системе адаптивного обучения можно выделить следующие блоки.

Блок мониторинга накапливает информацию низкого уровня: поступившую от обучаемого управляющую информацию в виде формулировок поисковых запросов и целей обучения, информацию обратной связи в виде автоматизированной оценки результатов выполнения контрольного задания или интерактивной самооценки результатов изучения теории («понятно», «требуется дополнительное объяснение» и др.), а также данные истории обучения.

Блок моделирования обучаемого анализирует данные мониторинга и выдает информацию высокого уровня: актуализированную модель обучаемого – достигнутый и целевой уровень знаний отдельных элементов курса, изучаемых понятий и др.

Блок принятия решения об адаптации оценивает отклонения от предполагаемых изменений модели обучаемого, определяет возможности достижения цели обучения и необходимость адаптации.

Блок адаптации осуществляет изменение сценария обучения в соответствии с принятым решением об адаптации и выбранным механизмом:

- адаптацию содержания к уровню знаний обучаемого путем отбора множества целевых кадров, которые необходимо изучить, и отбрасывания множества начальных кадров, содержание которых обучаемый усвоил;
- адаптивную поддержку навигации – построение/корректировку сценария обучения как логически упорядоченной последовательности целевых кадров, позволяющей выполнить постепенный переход от текущего состояния знаний обучаемого к целевому состоянию.

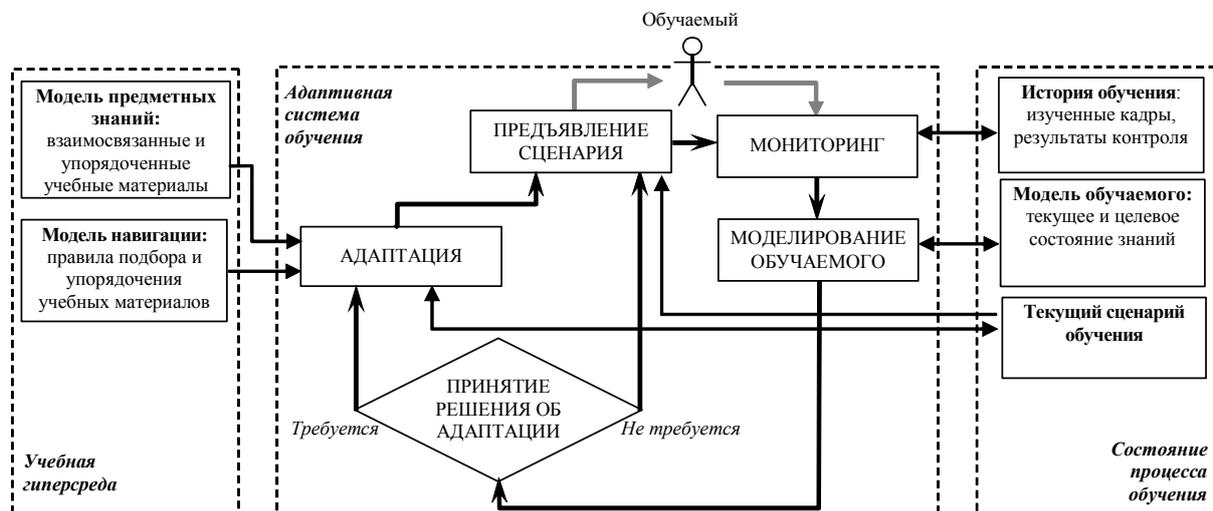


Рис. 1. Модель адаптивного процесса обучения

Степень соответствия содержания предъявляемого кадра текущей модели обучаемого может служить оценкой эффективности сценария обучения, поскольку чем выше этот показатель, тем больше экономия времени обучения, достигаемый обучающий эффект и точность контроля. Если курс избыточен, то дополнительное время требуется на отбор действительно необходимой информации, а если недостаточен – то на поиск недостающей.

Для обеспечения адаптации необходимо построение следующих моделей содержания и освоения учебной информации гиперсреды [4]:

– дидактически-ориентированной гипертекстовой модели предметных знаний в виде совокупности отношений (связей) различного дидактического статуса на множестве кадров учебной гиперсреды, каждый из которых дополнен дидактическим описанием представляемых или контролируемых знаний;

– модели навигации, формализующей процессы отбора учебной информации по критерию соответствия состоянию модели обучаемого и упорядочения этой информации согласно методике обучения.

Модель адаптивного процесса обучения, соответствующая приведенной схеме, формализует динамическую адаптацию состава учебного курса к изменениям знаний обучаемых. При этом адаптируется уровень сложности и объем предъявляемой учебной и контролирующей информации, реализуется возможность автоматического построения сценария обучения, соответствующего решаемой дидактической задаче. Для реализации данной модели необходимо разработать формальное представление состояния знаний обучаемого и знаний, изложенных в кадре гиперсреды, а также представление правил отбора учебного материала, соответствующих уровню знаний обучаемого.

3. Модель адаптивной учебной гиперсреды

Модель данных и знаний в адаптивной гиперсреде предложена в работе [4]. Рассмотрим связи между кадрами гиперсреды следующих типов: ассоциативные связи, представляющие традиционные связи в гипертексте, а также связи логической зависимости для смыслового упорядочения кадров и связи дидактической эквивалентности для определения альтернативных сценариев.

Перечисленные связи формализуем в виде бинарных отношений на множестве F кадров учебной гиперсреды ($F = T \cup Q$, где T – множество теоретических, а Q – множество контролирующих кадров). Так, *ассоциативное отношение* Σ определим как бинарное отношение на множестве F , формализующее типичные гипертекстовые связи.

Отношение логической зависимости Δ определим как антирефлексивное, транзитивное и антисимметричное бинарное отношение на множестве F (частичный строгий порядок). Для теоретических кадров $t_1, t_2 \in T$ логическая зависимость означает, что к изучению t_2 можно приступить только при наличии знания материала из t_1 . Контролирующий кадр q_2 логически зависит от $q_1 \in Q$, если для ответа на вопрос q_2 необходимо знать ответ на вопрос q_1 .

Отношение дидактической эквивалентности N определим как эквивалентность (рефлексивное, симметричное и транзитивное бинарное отношение) на семействе подмножеств F . Дидактически эквивалентными будем считать такие множества кадров гиперсреды, в которых изложены сведения или контролируются знания одинаковых понятий на одинаковом уровне представления и которые могут отличаться, например, используемой терминологией.

Орграф G_Δ отношения Δ и граф G_N отношения N используем для тематического структурирования и построения сценариев обучения в гиперсреде. Разбиение гиперсреды на тематические разделы с теоретической информацией или контрольными вопросами по определенной теме реализуется в соответствии со структурой оглавления учебника, положенного в ее основу. Всякое подмножество $R \subseteq F$ множества вершин орграфа G_Δ , соответствующее некоторому тематическому разделу, содержит начальную вершину с оглавлением, вводной частью или формулировкой целей обучения, а также конечную вершину, в которой размещаются выводы, итоговая информация, перечисление результатов изучения раздела. Из начальной вершины f_{B_R} выходят дуги во все вершины множества R , которые не имеют входящих дуг из других вершин этого раздела, а в конечную вершину f_{E_R} входят дуги из всех вершин рассматриваемого раздела, которые не имеют выходящих дуг в другие вершины этого раздела. Поскольку отношение Δ – строгий порядок, условимся говорить, что a больше b в том случае, если $(a, b) \in \Delta$. Тогда

начальная вершина f_{B_R} является наименьшим элементом частично упорядоченного множества R , а конечная вершина f_{E_R} – его наибольшим элементом. Формально понятие тематического раздела определим следующим образом.

Графом тематического раздела учебной гиперсреды будем называть каждый связный подграф $G_\Delta(R)$ графа G_Δ , индуцированный таким множеством $R \subseteq F$, которое имеет наибольший и наименьший элементы относительно Δ .

Трансцепью тематического раздела $G_\Delta(R)$ назовем его произвольную орцепь, началом которой является наименьший, а концом – наибольший элемент множества R вершин этого раздела. Объединением некоторых трансцепей назовем граф, множества вершин и дуг которого являются объединением, соответственно, множеств вершин и дуг этих трансцепей.

Подграф G_v графа тематического раздела $G_\Delta(R)$, который является объединением всех трансцепей этого раздела, содержащих некоторую вершину $v \in R$, будем называть *подразделом* раздела, соответствующим вершине v . Подраздел G_v включает все вершины, которые могут потребоваться для изучения вершины v , и те, которые могут быть изучены после нее.

Адаптивное управление процессом обучения с учетом рассмотренной формальной модели учебной гиперсреды состоит в построении адаптивного сценария обучения, содержащего исчерпывающую информацию в рамках цели обучения. Адаптивный сценарий строится как последовательность вершин, логически следующих за теми, которые уже изучены, и логически предшествующих целевым вершинам.

Для учета изученных кадров введем пометку множества вершин графа G_Δ логической зависимости в виде отображения изученности $\theta : F \rightarrow \{0, 1, null\}$, которое отражает знание (при $\theta(f) = 1$) или незнание (при $\theta(f) = 0$) некоторым обучаемым информации или ответа на вопрос, размещенный в вершине $f \in F$. Если $\theta(f) = null$, то «изученность f » не определена.

Если считать все дуги орграфа G_Δ логической зависимости направленными сверху вниз, то оказывается, что все вершины с кадрами, которые будут понятны обучаемому (с заданиями, которые он сможет выполнить), расположены в «верхней» части графа, а все остальные – в «нижней». Обозначим множество всех вершин раздела $G_\Delta(R)$ с кадрами, которые обучаемый не знает, через R_0 , а множество вершин, которые он знает, через R_1 . Тогда справедливо следующее утверждение.

Утверждение. Если для произвольной пары вершин a и b справедливы соотношения $a \in R_1$ и $b \in R \setminus R_1$, то $(b, a) \notin \Delta$; если для любой пары вершин c и d справедливы соотношения $c \in R \setminus R_0$ и $d \in R_0$, то $(d, c) \notin \Delta$.

В соответствии с утверждением, если выяснилось, что обучаемый знает учебный материал предъявленной вершины, можно условно исключить из орграфа G_Δ все вершины, расположенные выше нее, зафиксировав число таких вершин и добавив их в множество R_1 . Точно так же из G_Δ можно условно исключить все вершины, расположенные ниже вершины, знание которой не требуется (или материал которой обучаемый не знает), и добавить их во множество R_0 . Таким образом, значения отображения изученности θ можно доопределить на основании сведений о результатах изучения предъявленных вершин.

Обозначим множество изученных вершин через B , а множество целевых вершин, которые необходимо изучить, через A . Основой для построения модели навигации в гиперсреде служит граф G_Δ , а множество B (возможно, $B = \emptyset$) должно удовлетворять следующему условию насыщенности. Всякое подмножество V множества вершин любого тематического раздела $G_\Delta(R)$ будем называть *насыщенным*, если для любых вершин $b \in R$ и $a \in V$, удовлетворяющих соотношению $(b, a) \in \Delta$, справедливо $b \in V$ и во множестве V нет вершин, эквивалентных b . Проверка множества вершин сценария на насыщенность в процессе его формирования позволяет избегать логических разрывов в изложении и корректно строить альтернативные сценарии.

Пусть V – любое насыщенное множество вершин графа тематического раздела $G_\Delta(R)$, а $a \notin V$ – произвольная вершина. Если множество $V \cup \{a\}$ является насыщенным, то будем гово-

ритель, что вершина a непосредственно следует за множеством V или V непосредственно предшествует вершине a .

Для представления знаний, управляющих процессом навигации в учебной гиперсреде, будем использовать ориентированный гиперграф – такое обобщение орграфа, в котором вместо дуг используются гипердуги – упорядоченные пары непересекающихся множеств вершин [5, 6]. Представим управляющие знания для определения порядка изучения учебных материалов гиперсреды с учетом их логической зависимости в виде множества гипердуг-правил следующим образом.

Гиперграфом порядка изучения назовем ориентированный гиперграф $G = (F, P)$ специального вида, где F – множество кадров учебной гиперсреды; P – множество гипердуг, каждая из которых задается упорядоченной парой вида (B, A) , где $B, A \in 2^F$ (2^F – множество всех подмножеств F) и вершины множества A непосредственно следуют за множеством B . Множество B будем называть левой частью гипердуги, а A – ее правой частью. В левой части гипердуги расположены кадры, относительно которых предполагается, что они к моменту применения правила уже изучены, а каждый из кадров правой части может непосредственно следовать за этим множеством изученных кадров. На рис. 2 каждая гипердуга $p = (B, A)$ изображена в виде треугольника, через который проходят линии, исходящие из вершин множества B и входящие в вершины множества A . Примеры гипердуг: $p_1 = (\{f_3, f_4, f_{1*}, f_{2*}\}, f_{E_1})$, $p_2 = (\{f_1, f_2, f_3, f_4\}, f_{E_1})$, $p_3 = (\{f_5, f_6, f_7, f_8, f_9\}, f_{E_2})$, $p_4 = (\{f_{3*}, f_{4*}, f_{5*}\}, f_{E_2})$, $p_7 = (f_{B_1}, \{f_1, f_2, f_3, f_4\})$.

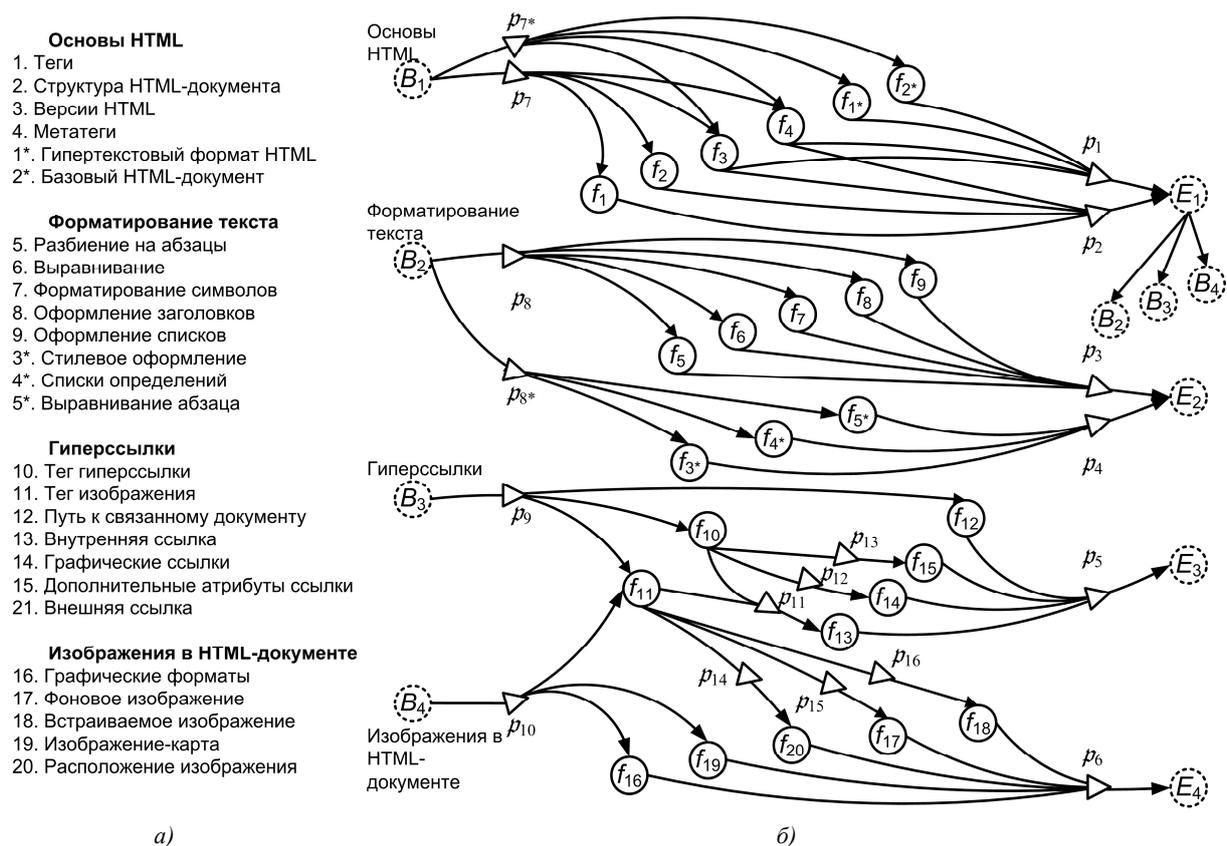


Рис. 2. Пример гиперграфа порядка изучения гиперсреды «Основы веб-конструирования»: а) список кадров некоторых разделов гиперсреды (оглавление); б) соответствующий гиперграф порядка изучения

4. Модели адаптивной навигации в гиперсреде

Динамическая адаптация состава учебного курса к изменениям знаний обучаемых предполагает, что на каждом шаге актуализируется модель обучаемого, а затем на этой основе принимается решение о выдаче соответствующей последовательности кадров гиперсреды для изучения. Адаптация осуществляется в два этапа: сначала с учетом модели обучаемого отбирается избыточное множество кадров, которые необходимо изучить, а затем строится сценарий обучения как последовательность отобранных кадров. Модель адаптивной навигации в гиперсреде представим как совокупность модели обучаемого и множества правил формирования сценария.

Модель обучаемого должна отражать целевые и текущие характеристики его знаний. В качестве данных о состоянии знаний обучаемого в изучаемой предметной области, которые являются исходными для формирования модели обучаемого, используем историю обучения. Под историей обучения будем понимать список кадров гиперсреды, для которых известно, усвоены они обучаемым или нет. Формальное представление модели обучаемого обозначим через λ , а множество всех таких моделей, допустимых гиперсредой, через Λ .

Правило формирования сценария зададим с помощью дидактической функции – частично-го мультиотображения $\pi(\lambda): \lambda \rightarrow O$, где $\lambda \in \Lambda$, а O – множество вершин сценария обучения, $O \subseteq F$. Данная функция устанавливает соответствие между текущей моделью обучаемого и множеством кадров, подлежащих изучению.

Модель адаптивной навигации можно формально представить как кортеж $\langle \pi_1(\lambda_1), \dots, \pi_k(\lambda_k), \dots, \pi_K(\lambda_K) \rangle$, где π_k – дидактическая функция, а λ_k – модель некоторого обучаемого, используемая на k -м шаге ($k = 1, \dots, K; K \geq 1$). Каждый последующий шаг может отличаться от предыдущего моделью обучаемого (целью, состоянием знаний) и/или дидактической функцией. При этом модель обучаемого и функция π могут корректироваться автоматически на каждом шаге обучения на основе информации обратной связи. Для актуализации модели обучаемого вводятся некоторые правила, различные в зависимости от вида модели. Изменение дидактической функции осуществляется в соответствии с принятым решением об адаптации и зависит от характера изменений модели обучаемого.

На основе предложенной модели гиперсреды разработаны модели навигации с адаптацией к уровню знаний обучаемого, к логической зависимости кадров гиперсреды и к дидактическому описанию кадров. Адаптация к уровню знаний обучаемого основана на байесовской стратегии выбора кадров, имеющих вероятность правильного выполнения (понятности), близкую к заданной [7]. Адаптация к логической зависимости обеспечивает отсутствие логических разрывов в изложении и корректное формирование альтернативных сценариев [4]. Адаптация к дидактическому описанию кадров позволяет осуществлять детальную настройку сценария обучения на уровень знаний обучаемого [8].

Адаптация к уровню знаний обучаемого. Рассмотрим следующие гипотезы $h_j \in H$ относительно состояния знаний обучаемого по теме: h_1 – обучаемый знает тему (правильный ответ), h_0 – обучаемый тему не знает. Обозначим априорную вероятность предъявления вершин j -го класса через $P(h_j)$, $j = 0, 1$. Элемент неопределенности в оценке уровня знаний обучаемого возникает за счет различий в используемой терминологии, неточности представлений системы об обучаемом и об ожидаемых результатах обучения.

Результат проверки знаний при взаимодействии с обучаемым фиксируется отображением изученности. Поэтому в качестве симптомов $s_i \in S$ оценки гипотезы для выбранной вершины v используем значение изученности: s_1 – обучаемый подтвердил знание, изученность $\theta(v) = 1$; s_0 – обучаемый не подтвердил знание, $\theta(v) = 0$. Обозначим вероятность события $\theta(v) = i$ через $P(s_i)$, $i = 0, 1$.

Обозначим также условную вероятность симптома как $P(s_i|h_j)$. Тогда $P(s_1|h_1)$ – условное распределение вероятностей подтверждения знания (понимания) для вершины из множества R_1 , а $P(s_0|h_0)$ – условное распределение вероятностей неподтверждения знания (непонимания) для вершины из множества R_0 . Значения этих условных вероятностей для конкретной гиперсреды могут быть получены в процессе апробации.

Исходной информацией об обучаемом служит вероятность того, что он знает (сможет изучить) данную тему. Эта вероятность определяется, например, по оценкам в журнале. В ка-

честве модели обучаемого u_l примем значение вероятности гипотезы h_1 : $\lambda_0(u_l) = P(h_1, u_l)$. Задача адаптации состоит в выборе для предъявления таких вершин v изучаемого раздела $G_\Delta(R)$, для которых после их изучения (выполнения задания) будет получена оценка знаний, соответствующая вероятности знаний данного обучаемого.

Построим модель навигации, осуществляющую выбор предъявляемых вершин с использованием эвристики, которая основана на сформулированном выше утверждении. Пусть R_v – множество всех вершин подраздела G_v , соответствующего некоторой вершине v из раздела $G_\Delta(R)$; $R_1(v)$ – множество всех вершин этого подраздела, которые обучаемый знает, а $R_0(v)$ – множество вершин из R_v , которые он не знает. Примем эвристический критерий $\eta(v, \lambda_k)$ соответствия некоторой вершины v и модели обучаемого на k -м шаге λ_k равным разности математического ожидания количества понятных вершин (верных ответов) в множестве R_v и числа вершин, которые расположены в графе логической зависимости выше вершины v : $\eta(v, \lambda_k) = \|R_v - |\lambda_k - |R_1(v)||$.

Дидактическая функция, осуществляющая выбор предъявляемой вершины v' , для которой значение критерия соответствия η минимально, имеет вид $\pi_k(\lambda_k) = \{v' | \eta(v', \lambda_k) = \min_{v \in R} \eta(v, \lambda_k)\}$.

После предъявления вершины v' и получения результата ответа $s(v') = s'$ актуализируем модель обучаемого u_l следующим образом: $\lambda(u_l) = P(h_1 | s')$. Для этого оценим апостериорные вероятности исследуемых гипотез по формуле Байеса:

$$\lambda_{i+1} = P(h_1 | s') = \lambda_i \alpha, \quad \alpha = \frac{P(s' | h_1)}{\sum_{k=0}^1 P(h_k) P(s' | h_k)}.$$

Для актуализации состава гиперсреды на k -м шаге требуется принятие решения ρ_k в пользу одной из гипотез: $\rho_1(s(v')) = h_1$ – обучаемый знает учебный материал, представленный в вершине v' ; $\rho_0(s(v')) = h_0$ – обучаемый не знает материала из v' . Применим метод Байеса для принятия решения о принадлежности вершины соответствующему классу R_1 или R_0 . Это позволит минимизировать потери, возникающие из-за наличия указанной неопределенности в оценке знаний.

Определим функцию $\varphi_{kj} = \varphi(\rho_k | h_j)$ как потери, возникающие в результате ошибки в оценке знаний, т. е. при отнесении предъявленной обучаемому вершины к классу k , в то время как она фактически принадлежит классу j , где $k, j = 0, 1$. Указанные потери связаны с дополнительными затратами времени на предъявление обучаемому вершин, которые он заведомо не поймет, или очевидной информации, которая ему уже известна. Используем функцию потерь, называемую «0/1 потери» и определяемую матрицей потерь

$$\|\varphi_{kj}\| = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

которая задает объединенные потери в случае $\rho_k(s') \neq h_j$ и отсутствие потерь в противном случае. После наблюдения s' математическое ожидание потерь, соответствующих выбору гипотезы $\rho_k(s') = h_k$, будет равно $\psi(\rho_k | s') = \sum_{j=0}^1 \varphi_{kj} P(h_j) \sum_{f \in R_i} P(s' | h_f)$, а суммарное математическое ожи-

дание потерь (средние суммарные потери) – $\psi(\rho | s) = \sum_{k=0}^1 \sum_{j=0}^1 \varphi_{kj} P(h_j) \sum_{f \in R_i} P(s_k | h_f)$.

В соответствии с байесовским подходом разбиение множества R на два класса обеспечивает минимум критерия ψ , если считать, что вершина $v' \in R$, для которой $P(h_1 | s') > P(h_0 | s')$, принадлежит классу R_1 , и принимается решение $\rho(s(v')) = h_1$. Решение $\rho(s(v')) = h_0$ принимается в противном случае. В зависимости от принятого решения учебная гиперсреда актуализируется следующим образом: $R(s(v')) = R \setminus R_1(v')$, если $\rho(s(v')) = h_1$, и $R(s(v')) = R \setminus R_0(v')$ в противном случае. Данная модель навигации может применяться для контроля знаний и для переобучения

(доучивания) в случае, когда неизвестно начальное множество вершин, которые обучаемый знает, и целевое множество, но можно оценить вероятность хорошей успеваемости обучаемого и известны вероятностные характеристики системы тестовых заданий.

Адаптация к логической зависимости. Адаптация к логической зависимости осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит определение начального множества вершин $B = \{v \mid v \in F, \theta(v) = 1\}$, содержащих изученные теоретические кадры (правильно выполненные задания, вопросы), и множества A целевых вершин обучения или контроля ($B, A \in 2^F$). Состав данных множеств может быть задан явно преподавателем/обучаемым или определен автоматически исходя из данных о множестве понятий, которые обучаемый усвоил. В качестве модели обучаемого u_i при адаптации к логической зависимости примем пару подмножеств множества вершин гиперсреды $\lambda_0(u_i) = (B, A)$.

На втором этапе для обучения требуется отобрать множество вершин, которые следуют за вершинами из B относительно Δ и способствуют достижению целей из A , т. е. предшествуют A относительно Δ . Основой для адаптивного отбора таких вершин при построении сценария обучения является следующее понятие выводимости.

Вершину t гиперграфа G назовем *выводимой* из произвольного множества вершин $B \subset F$, если $t \notin B$ и существует гипердуга $(B, A) \in P$ такая, что $t \in A$, а $B \subset B$ и $B \neq \emptyset$. Обозначим факт выводимости как $B - t$. Построение сценария обучения сводится к нахождению ориентированного гиперпути в гиперграфе $G = (F, P)$ из множества вершин B в множество вершин A . Введем следующее определение.

Подгиперграфом гиперграфа $G = (F, P)$ называется гиперграф $G' = (F', P')$, образованный подмножеством гипердуг $P' \subseteq P$ и инцидентных им вершин $F' \subseteq F$. Минимальным (по включению гипердуг) будем называть такой подгиперграф, в котором каждые две вершины соединены не более чем одной гипердугой.

Ориентированным гиперпутем, или просто гиперпутем, M_{BA} в гиперграфе G из начального множества вершин B в множество вершин A будем называть минимальный подгиперграф $M_{BA} = (F', P')$, такой, что $B \cup A \subseteq F'$, каждая вершина из $F' \setminus B$ является элементом правой части некоторой гипердуги из P' и эта гипердуга единственная [6]. В работе [4] были сформулированы требования к гиперграфу порядка изучения, которые гарантируют получение представительного, корректного и непротиворечивого гиперпути. Было показано, что вывод сценария на основе гиперграфа предлагаемого вида гарантирует включение в сценарий вершин из правой части каждой гипердуги только тогда, когда все необходимое для их изучения там уже будет. Гарантируется также, что в сценарий войдет только один элемент из каждого класса дидактической эквивалентности.

Построим модель навигации, осуществляющую выбор и логическое упорядочение предъявляемых вершин с учетом наличия у обучаемого знаний некоторого начального множества вершин. До начала обучения $\pi_0(\lambda_0) = B$. На $(k+1)$ -м шаге дидактическая функция запишется в виде $\pi_{k+1}(\lambda_{k+1}) = \{v' \mid v' \in F, \pi_k(\lambda_k) - v'\}$. Функция $\pi_{k+1}(\lambda_{k+1})$ определяет множество кадров, которые выводимы из множества $\pi_k(\lambda_k)$, изученного обучаемым, и способствуют достижению цели A . Правило актуализации модели обучаемого имеет вид $\lambda_{k+1} = \{B \cup \pi_k(\lambda_k), A \setminus \pi_k(\lambda_k)\}$, где K – количество шагов обучения. Условие окончания обучения представляется как $\pi_K(\lambda_K) \supseteq A$.

Дидактически-ориентированная адаптация содержания. Дидактически-ориентированный подход к определению дидактической функции основан на моделировании понятийной структуры изучаемого предмета путем применения тезауруса и механизмов семантического индексирования в сочетании с моделированием дидактических знаний об уровнях изложения понятий и порядке их изучения [8].

Для формального представления дидактических характеристик учебного материала и состояния знаний обучаемого используем *дидактический образ состояния знаний* в виде множества значений уровня усвоения изучаемых понятий, измеряемых по некоторой шкале порядка. Шкалу порядка представим конечным упорядоченным множеством уровней усвоения

$X = \langle null, x_1, \dots, x_j, \dots, x_{N_X} \rangle$, где если $i < j$, то $x_i < x_j$ для любого $i, j \in \{1, \dots, N_X\}$. Пустой элемент обозначается nul , $null < x_j$ для любого j .

Пусть U – множество обучаемых, а D – множество понятий предметной области и $N_D = |D|$. Зададим отображение σ , которое сопоставляет каждому понятию $d_n \in D$ уровень $r_{i_n} = r(u_i, d_n) = x_j$ его усвоения обучаемым u_i , $x_j \in X$. Дидактическим образом состояния знаний назовем результат отображения σ для состояния знаний обучаемого u_i : $\sigma_i = (r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_{N_D}})$.

Дидактический образ состояния знаний можно использовать как единый набор признаков для описания как состояния знаний обучаемого, так и знаний, представленных в вершине гиперсреды. Множество всех возможных дидактических образов знаний, рассматриваемых системой, обозначим через S . Зададим отображение $\tau: F \rightarrow S \times S$ множества учебных вершин F в множество пар дидактических образов. Обучающим воздействием вершины $v_k \in F$ назовем элемент отображения τ : $\tau(v_k) = \tau_k = (\tau_k^i, \tau_k^o)$, где $\tau_k^i = (r_{k_1}^i, r_{k_2}^i, \dots, r_{k_{N_D}}^i)$ – условие предъявления, $\tau_k^o = (r_{k_1}^o, r_{k_2}^o, \dots, r_{k_{N_D}}^o)$ – результат изучения вершины, а $r_{k_n}^o, r_{k_n}^i$ – результирующий и начальный уровни изучения понятия d_n . Условие предъявления характеризует знания, которые требуются для перехода к изучению вершины, а результат изучения – знания, представленные в вершине.

Далее построим формальную модель обучаемого. Пусть S_A – все возможные целевые, а S_B – возможные начальные/текущие дидактические образы знаний обучаемого из S . Зададим отображение $\lambda: U \rightarrow S_B \times S_A$ множества обучаемых в множество всех возможных пар начального и целевого дидактических образов знаний обучаемого. В качестве модели обучаемого u_i примем элемент отображения $\lambda(u_i)$: $\lambda(u_i) = (\sigma_b, \sigma_a)$, причем $\sigma_b = (r_{b_1}, r_{b_2}, \dots, r_{b_{N_D}})$ – текущий, $\sigma_a = (r_{a_1}, r_{a_2}, \dots, r_{a_{N_D}})$ – целевой дидактические образы знаний, а r_{b_n} и r_{a_n} – текущий и целевой уровни изучения понятия d_n , где $\sigma_b \in S_B$, $\sigma_a \in S_A$, $r_{a_n}, r_{b_n} \in X$. Модель обучаемого данного вида характеризует множество понятий, которые необходимо изучить на соответствующем уровне для достижения целей σ_a из S_A , имея состояние знаний σ_b из S_B .

Построим модель навигации, осуществляющую отбор предъявляемых вершин по результатам сопоставления множества понятий, изучаемых в вершине, и состояния знаний обучаемого. Введем функцию согласия $\phi_m(\tau_k, \lambda_k)$, фиксирующую факт увеличения уровня усвоения некоторого целевого понятия d_m после изучения τ_k : $\phi_m(\tau_k, \lambda_k) = 1$, если $r_{b_m} \leq r_{k_m}^o \leq r_{a_m}$, $r_{k_m}^o \neq null$, $r_{a_m} \neq null$, и $\phi_m(\tau_k, \lambda_k) = 0$ в противном случае, $m \in \{1, \dots, N_D\}$.

Критерий соответствия, вычисляющий количество целевых понятий, для которых увеличивается уровень усвоения после изучения исследуемой вершины, примет вид $\eta(v_k, \lambda_k) = \sum_{m=1}^{N_D} \phi_m(v_k, \lambda_k)$.

Условие соответствия вершины цели обучения σ_a : $\eta(\tau_k, \lambda_k) \geq 1$. Для выбора вершины v' , наиболее соответствующей текущей модели обучаемого, используем дидактическую функцию вида $\pi(\lambda_k) = \{v' | \eta(v', \lambda_k) = \max_{v \in R} \eta(v, \lambda_k)\}$, $\lambda_k \in \Lambda$.

Заключение

В статье предложена модель процесса автоматизированного обучения, включающая средства формализации предметных знаний и навигации в учебной гиперсреде, а также построения эффективных сценариев обучения и контроля знаний, учитывается образовательный статус кадров и связей гиперсреды, решаемые ими дидактические задачи, а также их соответствие уровню знаний обучаемого. Модель обеспечивает автоматическое построение сценария обучения, соответствующего решаемой дидактической задаче, и адаптацию этого сценария к логической зависимости кадров учебной гиперсреды и уровню знаний обучаемого.

Создание адаптивной учебной гиперсреды, основанной на модели данных и знаний, которая представлена в статье, позволит реализовать процесс проектирования учебного курса, согласуемый с традиционными педагогическими методиками автоматизированного обучения, а также осуществлять автоматизированное обучение с динамической адаптацией содержания и структуры учебного курса к текущему состоянию знаний обучаемого.

Список литературы

1. Шибут, М.С. Экспертно-обучающие системы и средства их создания: учеб.-метод. пособие / М.С. Шибут. – Минск: БГАТУ, 2003. – 56 с.
2. Murray, T. Authoring Intelligent Tutoring Systems: An analysis of the state of the art / T. Murray // International Journal of Artificial Intelligence in Education. – 1999. – № 10. – P. 98–129.
3. Brusilovsky, P. Adaptive hypermedia / P. Brusilovsky // User Modeling and User Adapted Interaction. – 2001. – № 11 (1/2). – P. 87–110.
4. Липницкий, С.Ф. Гипертекстовая экспертно-обучающая система. I. Модель данных и знаний / С.Ф. Липницкий, М.С. Шибут, Н.А. Ярмош // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 1998. – № 3. – С. 111–114.
5. Gallo, G. Directed Hypergraphs as a Modeling Paradigm / G. Gallo, M.G. Scutella // Rivista AMASES. – 1998. – № 21. – P. 97–123.
6. Ramaswamy, M. Using directed hypergraphs to verify rule-based expert systems / M. Ramaswamy, S. Sarkar, Y.-S. Chen // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1997. – № 9 (2). – P. 221–237.
7. Липницкий, С.Ф. Метод автоматизированного контроля знаний в гипертекстовой среде / С.Ф. Липницкий, М.С. Шибут, Н.А. Ярмош // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. тэхн. навук. – 2000. – № 1. – С. 86–89.
8. Корлуженко, В.А. Модель адаптивной учебной гиперсреды по тематике информационной безопасности / В.А. Корлуженко, В.К. Фисенко, М.С. Шибут // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Информационная безопасность». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – № 1 (76). – С. 223–227.

Поступила 07.05.07

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: m_shi@tut.by*

M.S. Shibut

MODELLING THE ADAPTIVE PROCESS OF LEARNING IN THE HYPERENVIRONMENT

The model of adaptive process of learning in the hyperenvironment is proposed, allowing to create the didactic – focused description of the learner knowledge condition and of the knowledge represented in the hyperenvironment. Adaptation includes the construction of the script of training containing irredundant sequence of the staff necessary for studying, in view of available knowledge and purposes of training.