УДК 004.89

А. С. Домников, канд. техн. наук, доц., asdomnikoff@mail.ru,
В. В. Белоус, канд. техн. наук, доц., walentina.belous@bmstu.ru
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Синтез рационального упорядочения учебных модулей методом Бержа

Рассматривается задача построения рационального упорядочения учебных модулей электронного курса. Исследованы особенности этой задачи и сделан вывод о невозможности ее решения классическим методами математического программирования и математической статистики. Исходную информацию для синтеза рационального порядка учебных модулей дает экспертный опрос или данные, заключенные в гипертекстовой структуре ссылок. Рассматриваются два типа экспертной информации: четкое и нечеткое бинарные отношения предпочтения на множестве учебных модулей. Предлагается способ сведения всех трех структур к нормализованному виду — матрице парных сравнений с простой калибровкой. Решать задачу упорядочения предлагается с помощью метода Бержа, который прошел широкую апробацию в различных прикладных областях.

Ключевые слова: *электронный курс, упорядочение, теория принятия решений, бинарные отношения, нечеткое бинарное отношение, дискретное математическое программирование, калибровочное условие, метод Бержа, матрица парных сравнений*

Введение

В наше время происходит бурное развитие электронных обучающих технологий и их экспансия в различные образовательные отрасли и учреждения. Электронное образование — совокупность методов и технических средств, предназначенных для дистанционного синтеза и приобретения знаний. Оно базируется на возможностях современной вычислительной техники и информационно-коммуникационных технологиях и обладает множеством преимуществ по сравнению с традиционными образовательными методиками — это, прежде всего, интерактивность, доступность, оперативность, гибкость, мобильность, экономичность, массовость, возможность создания единых образовательных сред, доступ к большим электронным библиотекам и базам данных и др. [1, 2].

Массовое внедрение электронных образовательных технологий в учебный процесс требует решения множества методических, педагогических, инженерных и научных задач. Основной массив публикаций по этой тематике посвящен обсуждению педагогических проблем и реализации методических приемов и прикладных дисциплин в конкретных программных средах, например Moodle или Sakai [1, 3]. В публикациях на русском языке достаточно полно освещена задача генерации модульного состава электронных образовательных дисциплин [4]. Важнейшая проблема синтеза рациональной модульной структуры учебных курсов находится на периферии исследователей. Работы [2, 5, 6] составляют немногочисленные исключения из этого правила.

В статье рассматривается проблема построения линейной последовательности заданного множества электронных учебных модулей. Предлагается метод решения этой задачи, общий для трех различных источников исходной информации о парных предпочтениях отдельных модулей.

Электронные учебные модули

Современные системы электронного образования основаны на модульной парадигме организации учебных курсов. Учебный материал делится на относительно замкнутые фрагменты, которые могут включать в себя текстовые, графические, мультимедийные блоки и содержать ссылки на другие внешние и внутренние фрагменты. Среди специалистов в области педагогики и электронного обучения существуют некоторые разногласия по поводу точного определения учебного модуля. Чаще всего модулем считается относительно замкнутый фрагмент учебного контента, дающий достаточно полное толкование некоторого вопроса или темы и имеющий минимальное число внешних смысловых отсылок.

В современных системах электронного обучения модули хранятся в общем репозитории и служат элементарными разделяемыми единицами контента для различных учебных материалов, которые собираются из этих элементарных блоков. Стандарт SCORM (Sharable Content Object Reference Model), который является стандартом де-факто для современных систем в области электронного образования, ориентирован на глубокую структуризацию учебных материалов и поддерживает их модульную структуру.

Модульная организация образовательного контента имеет несколько бесспорных преимуществ, главными из которых являются:

- гибкость и высокая совместимость;
- реентерабельность модулей;
- возможность организации гипертекстовых учебных курсов.

Все современные электронные курсы снабжены гипертекстовой ссылочной разметкой, которая допускает нелинейную последовательность изучения с возможными возвратами и ревизией ранее пройденного материала. Однако линейная упорядоченность, когда порции учебного материала следуют последовательно одна за другой, имеет большое число методических и организационных преимуществ по сравнению с другими "маршрутами обучения". Так, в форме линейного упорядочения модулей учебные курсы представляются в методических документах, учебных программах, рекламных материалах, индивидуальных планах и др. Эта форма используется в оперативном управлении учебным процессом, при выборе индивидуальной стратегии обучения, для решения логистических и организационных задач, обеспечивающих учебный процесс [6].

Особенности рационального упорядочения учебных модулей. Рациональное упорядочение элементов дискретного множества — это хорошо изученная задача математического программирования и теории расписаний [7—9]. Однако попытка применения классического аппарата для упорядочения электронных учебных модулей сталкивается с принципиальными затруднениями, причинами которых являются особенности этой задачи. Перечислим главные.

- *Сложность.* В общем случае электронные учебные курсы имеют сложную многосвязную структуру, состоящую из нескольких десятков модулей и отличающуюся высокой плотностью связей.
- *Структурная динамичность.* Структура учебного курса может динамически перестраиваться. Это может вызываться различными причинами: новыми научными данными, публикацией новаторских учебных материалов, модификацией методических установок и приемов и др.
- *Структурная неопределенность.* Сведения о разбиении курсов на модули и связях между ними формируются на основании экспертных опросов. Любые, даже самые искусные, процедуры экспертного опроса не могут преодолеть субъективность экспертного знания, которая проявляется в принципиально неустранимой неопределенности формируемых структур.
- *Высокая цикломатика.* Множество связей, задающих парное упорядочение модулей, порождает в исходной структуре большое число ориентированных циклов, для элементов которых не может быть построена непротиворечивая ранжировка.
- *Структурная неоднородность.* Структура модулей учебного курса отличается принципиальной неоднородностью. В общем случае эта структура может состоять из нескольких компонентов связности и включать в себя обширные линейные и многосвязные фрагменты.

"Мягкие" модели, основанные на парадигме теории принятия решений и теории нечетких множеств, полнее учитывают своеобразие задачи упорядочения учебных модулей и лучше подходят для ее решения.

Постановка задачи

Для синтеза рационального упорядочения учебных модулей можно использовать различную исходную информацию. Таковой может быть мнение эксперта (сообщества экспертов), который на основе анализа множества модулей учебной программы формирует систему парных предпочтений предшествования. Эти предпочтения могут быть представлены на языке четких бинарных или нечетких бинарных отношений и записаны в виде матрицы парных сравнений или графа предпочтений.

Пусть нужно решить задачу формирования состава модулей некоторого электронного учебного курса или программы. Обозначим через $X = \{x_i\}_{i=1}^{n}$ множество модулей курса. Будем считать, что проведен опрос эксперта и получены экспертные данные о парных предпочтениях на множестве X. Представим эти данные в виде матрицы парных сравнений $A = \|a_{ij}\|$, где

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } x_i \text{ предшествует } x_j, \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Легко видеть, что матрицу A можно рассматривать как матрицу смежности некоторого графа $G = (X, D)$, у которого $X = \{x_i\}_{i=1}^{n}$, $D = \{d_j\}$ — множества вершин и дуг соответственно. Дуга $d = (x_i, x_j)$ соединяет вершину x_i с вершиной x_j тогда и только тогда, когда $a_{ij} = 1$. Граф G будем называть *графом предпочтений.* Требуется найти такую ранжировку множества модулей (вершин графа) X, которая наилучшим образом согласуется со структурой предпочтений эксперта, заданной в виде матрицы A или графа G.

Во многих ситуациях экспертная информация о парных предшествованиях модулей задается в виде нечеткого бинарного отношения предпочтения с функцией принадлежности μ: $X \times X \to [0, 1]$. Тогда элементы a_{ij} матрицы парных сравнений A получают значения функции принадлежности нечеткого отношения предпочтения $\mu_{ij} = \mu(x_i, x_j) \in [0, 1]$, а граф предпочтений $G = (X, D)$ формируется по следующим правилам: дуга $d = (x_i, x_j)$ соединяет вершину x_i с вершиной x_j тогда и только тогда, когда $\mu_{ij} > 0$. Дуги $d \in D$ взвешиваются значениями функции принадлежности.

Иной тип исходных данных дают гипертекстовые или гиперссылочные структуры на множестве учебных модулей, которые являются отражением понятийной и терминологической организации предметной области. Не будет преувеличением сказать, что все современные электронные учебные курсы разработчики снабжают развитой системой гиперссылочных команд. Они реализуют смысловые связи между отдельными единицами контента:

терминами, определениями, текстовыми фрагментами, глоссарием, алфавитным указателем и др. Ссылочная система строится на более объективных основаниях, нежели экспертные предпочтения, поскольку отражает понятийную структуру данной предметной области.

Не будем учитывать гиперссылки технического характера (например, на подрисуночные подписи, номера таблиц, формулы и др.) и ограничимся рассмотрением ссылок текстовых фрагментов, которые выражают интенциональные порядковые отношения между отдельными модулями. Иными словами, если существует ссылка из модуля y в модуль x, то это означает, что для освоения y необходимо знать материал, изложенный в x, т. е. x должен предшествовать y в процессе обучения.

Пусть $X = \{x_i\}_{i=1}^{n}$ — множество модулей, а структура электронного курса задана в виде графа $G = (X, D)$, в котором вершины представляют модули, а дуга $d = (x, y) \in D$ соединяет вершину x с вершиной y тогда и только тогда, когда существует гиперссылка из модуля y на модуль x. В больших электронных курсах, где плотность связей высока, могут существовать кратные взаимные гиперссылки модулей. В этом случае структура электронного курса задается в виде взвешенного ориентированного графа $G = (X, D)$, в котором каждой дуге $d = (x, y) \in D$ сопоставляется число a_{xy}, равное числу гиперссылок, связывающих y с x.

Задача синтеза рационального упорядочения модулей заключается в поиске такого упорядочения (частичного или линейного) множества модулей $X = \{x_i\}_{i=1}^{n}$, которое наилучшим образом согласуется с исходной структурой предпочтений $G = (X, D)$.

Структуры предпочтений будем обозначать далее следующим образом: G_1 — четкое отношение предпочтения; G_2 — нечеткое отношение предпочтения; G_3 — гиперссылочная структура.

Постановка задачи рационального упорядочения учебных модулей как задачи поиска наилучшей аппроксимации структуры предпочтений отличается большой гибкостью, поскольку допускает применение большого числа различных способов решения, заимствованных из различных разделов дискретной математики и информационных технологий. Например, ее можно свести к следующим задачам:

- задача о наилучшей приближенной триангуляции матрицы [10];
- задача поиска асимметричной части бинарного отношения предпочтения или квазипорядка [4];
- задача дискретного математического программирования [6];
- задача принятия решений [9] и др.

Синтез рационального упорядочения модулей

В предыдущих публикациях авторов рассматривалась задача рационального упорядочения учебных модулей в различных постановках. Так, поиск наилучшей линейной аппроксимации для четкой структуры предпочтений G_1 обсуждался в работе [5]. Задача решалась с помощью аппарата бинарных отношений и дискретного математического программирования. Исходная структура G_1 рассматривалась как бинарное отношение предпочтения, из которого выделялись ассиметричная G_{1a} и симметричная G_{1c} части: $G_1 = G_{1a} + G_{1c}$. Транзитивное замыкание $T(G_{1a})$ асимметричной части отношения представляет собой частичный порядок на множестве модулей, который может быть продолжен до линейного порядка.

В [6] предложена модель линейного упорядочения для обработки гипертекстовой структуры предпочтений G_3. В этой статье задача решалась с помощью классического метода максимального согласования. Исходная структура предпочтений в общем случае представляется в виде сильно связного графа $G = (X, D)$, который включает в себя набор контуров (ориентированных циклов). В методе максимального согласования граф предпочтений приводится к бесконтурному виду. Для этого ищется минимальное множество дуг, которые принадлежат всем контурам графа, и эти дуги исключаются из G. В результате получается бесконтурный граф, который допускает непротиворечивое упорядочение вершин многими разными способами, например с помощью алгоритмов топологической сортировки Тарьяна или Кана [7].

Синтез рационального упорядочения модулей в нечеткой постановке (для структуры G_2) рассмотрен в [6]. В этой статье предложены несколько способов синтеза рациональных ранжировок, которые учитывают расплывчатый характер исходной информации: упорядочение на основе функции доминируемости, синтез упорядочения разложением нечеткого множества на уровни и сведение задачи к задаче дискретного математического программирования.

В данной статье для обработки всех трех исходных структур предпочтений G_1 — G_3 предлагается использовать один метод.

В любой задаче принятия решений элементы матрицы парных сравнений $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ (матрицы смежности графа G) не могут принимать произвольные значения. Они должны подчиняться ограничениям, которые в теории принятия решений называются калибровочными условиями, или калибровками [10]. Калибровочное условие зависит от способа извлечения исходной информации и решающим образом влияет на выбор метода рационального упорядочения.

Основными калибровками являются следующие:

- простая калибровка (ПК):

$$\forall i, j,\ i \neq j,\ a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } x_i > x_j; \\ 0, \text{ если } x_i < x_j; \end{cases}$$

- турнирная калибровка (Т):

$$\forall i, j,\ a_{ij} \geqslant 0,\ a_{ij} + a_{ji} = \text{const};$$

- степенная калибровка (С):

$$\forall i, j,\ a_{ij} > 0,\ a_{ij} \times a_{ji} = 1;$$

- кососимметрическая калибровка (К):

$$\forall i, j,\ a_{ij} + a_{ji} = 0;$$

- вероятностная калибровка (В):

$$\forall i, j,\ 0 \leqslant a_{ij} \leqslant 1,\ a_{ij} + a_{ji} = 1.$$

Если элементы матрицы парных сравнений принимают произвольные целочисленные значения, то исходную структуру предпочтения называют *взвешенной структурой*.

Легко видеть, что четкое отношение предпочтения G_1 имеет простую калибровку (ПК), нечеткое отношение предпочтения G_2 не подчиняется ни одной калибровке, а гиперссылочная структура G_3 представляет собой произвольный граф, взвешенный целыми числами (взвешенная структура).

Рассмотрим метод построения рационального порядка, который способен обработать любую из рассмотренных исходных структур $G = (X, D)$. В публикациях по теории принятия решений этот метод называется методом Бержа или Брука—Буркова. Метод был испытан на множестве различных прикладных задач в экономике и показал свою адекватность и высокую эффективность. Он удовлетворяет большей части аксиом рационального упорядочения критериев, которые используются в теории принятия решений для проверки качества методов ранжировки. Обязательное условие применения метода — простая калибровка матрицы парных сравнений [10].

Структура G_3, ребра которой взвешены произвольными целыми числами, сводится к простой калибровке следующим образом:

$$b_{ij} = [\mathrm{sign}(a_{ij} - a_{ji}) + 1],\ \forall i, j,\ i \neq j. \quad (1)$$

Структуру G_2 можно привести к вероятностной калибровке с помощью простого преобразования, которое не вносит значительных искажений в исходные предпочтения. Пусть a_{ij} и a_{ji} — любые два элемента матрицы парных сравнений $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$, которая описывает G_2. По определению $0 \leqslant a_{ji}, a_{ij} \leqslant 1$. Преобразуем элементы этой матрицы следующим образом: $\forall i, j,\ i \neq j\ b_{ij} = \dfrac{a_{ij}}{a_{ij} + a_{ji}}$. Легко видеть, что $b_{ij} + b_{ji} = 1$, т. е. элементы матрицы $B = \|b_{ij}\|_{n \times n}$ удовлетворяют вероятностной калибровке. Модифицированная матрица парных B сравнений приводится к простой калибровке посредством преобразования (1), что дает возможность решать данную задачу методом Бержа.

Метод Бержа состоит из двух этапов: грубое ранжирование; тонкое ранжирование. Напомним основные положения *грубого ранжирования*. На этом этапе исходная структура предпочтений $G = (X, D)$ разбивается на совокупность бикомпонент. Бикомпонентой называется максимальное по включению множество вершин графа, любая пара элементов которого состоит в отношении взаимной достижимости. Деление на бикомпоненты является разбиением множества вершин, т. е. задает отношение эквивалентности. Факторизация отношения предпочтения $G = (X, D)$ по данной эквивалентности представляет собой ациклическое отношение (ациклический граф), которое допускает непротиворечивую топологическую сортировку своих вершин. Результатом грубого ранжирования является частичный порядок, построенный на бикомпонентах графа $G = (X, D)$.

На этапе *тонкого ранжирования* ищется упорядочение вершин каждой бикомпоненты. Если такое упорядочение будет построено, то "склеивание" двух порядков (грубого и тонкого) даст результирующую ранжировку. Все операции грубого ранжирования хорошо изучены и имеют эффективные алгоритмы решения.

Рассмотрим этап тонкого ранжирования, который по сравнению с грубым ранжированием отличается достаточно громоздким обоснованием и вычислительной сложностью. Пусть C — некоторая бикомпонента графа G. Перенумеруем вершины графа таким образом, чтобы элементы бикомпоненты C получили номера от 1 до r. Обозначим $M = \|a_{ij}\|_{r \times r}$ часть матрицы парных сравнений, которая соответствует объектам бикомпоненты C. Будем использовать спортивные аналогии и вместо громоздких терминов "доминирование" и "число доминирований" будем говорить о победе и силе объекта. Силой первого порядка объекта x_i, $i = 1, ..., r$, назовем строчную сумму $\sum\limits_{i=1}^{r} a_{ij}$ в матрице M. Будем говорить, что объект x_i одержал победу второго порядка над x_j, если существует объект x_k такой, что $x_i \geqslant x_k$ и $x_k \geqslant x_j$. Числом побед второго порядка, одержанных x_i над x_j, называется сумма

$$\sum_{k=1}^{r} a_{ik}a_{kj}. \quad (2)$$

Силой второго порядка объекта x_i назовем общее число побед второго порядка, одержанных этим объектом над всеми иными объектами, т. е. величину

$$\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r} a_{ik}a_{kj}. \quad (3)$$

Легко видеть, что выражение (2) есть число, стоящее на пересечении i-й строки и j-го столбца матрицы $M^2 = M \times M$, а выражение (3) — сумма всех элементов i-й строки в этой матрице.

По аналогии можно определить силу третьего, четвертого и так далее порядков объекта i как строчные суммы в матрицах M^3, M^4 .... Обозначим через d_i^n силу n-го порядка объекта i. Под относительной силой n-го порядка понимается величина $t_i^n = \dfrac{d_i^n}{\sum\limits_{k=1}^{r} d_k^n}$. Показано, что существует предел $t_i = \lim\limits_{n \to \infty} t_i^n$, который называется относительной силой объекта x_i, а вектор $t = (t_1, t_2, ..., t_r)$ — предельным вектором.

Тонкое ранжирование объектов, принадлежащих одной бикомпоненте, выполняется по значениям предельного вектора по следующему простому правилу: $x_i \geqslant x_j \Leftrightarrow t_i \geqslant t_j$. Оказалось, что предельный вектор является собственным вектором матрицы парных сравнений $M = \|a_{ij}\|_{r \times r}$, что позволяет искать этот вектор не как предел, а использовать для этого глубоко разработанные методы вычислительной математики [11, 12].

Описанный метод тонкого ранжирования отличается высокой чувствительностью к деталям исходной структуры предпочтений. Так, он учитывает не только прямую силу, т. е. число побед, которые одержал объект, но и опосредованные победы разной длины. При этом победы над сильными объектами ценятся выше, и это различное качество подсчитывается автоматически, без использования различных весовых коэффициентов.

Пример

Рассмотрим применение этого метода для обработки структуры предпочтений, показанной на рис. 1. На этом рисунке показаны отношения предшествования, которые, по мнению эксперта, существуют между отдельными учебными модулями, входящими в дисциплину "искусственный интеллект".

Матрица парных сравнений $A = \|a_{ij}\|_{11 \times 11}$ этой структуры показана в табл. 1.

Рис. 1. Структура предпочтений модулей дисциплины "искусственный интеллект"

Разбиение данной структуры на сильносвязные фрагменты показало, что она состоит из трех бикомпонент $C_1 = \{5\}$, $C_2 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ и $C_3 = \{1\}$, грубое ранжирование которых представляется следующей схемой: $\{5\} \to \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\} \to \{1\}$.

Рассмотрим тонкое ранжирование бикомпоненты $C_2 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$. Матрица парных сравнений $M = \|a_{ij}\|_{9 \times 9}$ этого фрагмента приведена в табл. 2.

Нахождение предельного вектора — это весьма трудоемкая вычислительная задача. Вместо относительных сил объектов подсчитаем их силы конечного порядка как строчные суммы в матрицах M, M^2, M^3, ..., M^9. Сведем результаты в табл. 3. В этой таблице число, стоящее на пересечении i-й строки и j-го столбца, есть сила j-го порядка объ-

Таблица 1

Матрица парных сравнений исходной структуры предпочтений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2	1		1							1	
3		1									
4										1	1
5										1	1
6										1	1
7		1		1		1		1	1		1
8		1				1					1
9						1		1			
10											1
11							1				

Таблица 2

Матрица парных сравнений бикомпоненты C_2

	2	3	4	6	7	8	9	10	11
2		1						1	
3	1								
4								1	1
6								1	1
7	1		1	1		1	1		1
8	1			1					1
9				1		1			
10									1
11					1				

Таблица 3

Силы конечного порядка модулей

	d_i^1	d_i^2	d_i^3	d_i^4	d_i^5	d_i^6	d_i^7	d_i^8	d_i^9
2	2	2	3	8	15	30	61	135	278
3	1	2	2	3	8	15	30	61	135
4	2	2	7	18	34	68	154	341	672
6	2	2	7	18	34	68	151	322	665
7	6	12	22	46	105	217	448	946	2010
8	3	5	10	22	48	95	203	429	905
9	2	5	7	17	40	82	163	354	751
10	1	1	6	12	22	46	105	217	448
11	1	6	12	22	46	105	217	448	946

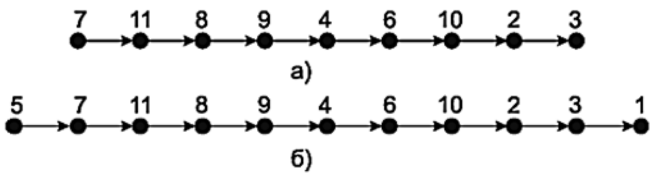

Рис. 2. Тонкое ранжирование (*а*) и итоговое упорядочение модулей (*б*)

екта с номером i. Построим упорядочение объектов не по значениям предельного вектора, а по силам конечного порядка.

Как видно из табл. 3, столбцы d^k при $k = 1, 2, ..., 6$ имеют совпадающие значения, что не дает возможности синтезировать строгое упорядочение объектов. Все значения в столбцах d^7, d^8 и d^9 различаются, что позволяет построить тонкое ранжирование, показанное на рис. 2, *а*.

Объединив результаты грубого и тонкого ранжирования, получим линейное упорядочение, представленное на рис. 2, *б*.

Перспективы дальнейших исследований

Описанные результаты не исчерпывают, конечно, всей глубины решаемой проблемы. Представляется перспективной попытка построения некоторой интегральной структуры $G = G_1 \oplus G_2 \oplus G_3$, которая учитывает информацию о парных предпочтениях, хранящуюся в четкой G_1, нечеткой G_2 и гипертекстовой G_3 структурах. В простейшем случае интегральная структура может представлять собой простую взвешенную сумму матриц смежности, задающих G_1, G_2, G_3 или только G_2 и G_3, если четкое исходное предпочтение считать частным случаем нечеткого.

Еще одно направление исследований, которое представляется весьма перспективным для решения поставленной задачи, состоит в использовании аппарата принятия групповых решений. Обозначим через $\mathcal{M}_i$ некоторый метод синтеза рационального упорядочения, который может быть применен для обработки исходной структуры предпочтений G непосредственно или после предварительной модификации калибровочных условий, например: $\mathcal{M}_1$ — метод Бержа; $\mathcal{M}_2$ — метод максимального согласования; $\mathcal{M}_3$ — метод Жуковина и др. [10]. Ранжировку $P_i(M_i, G)$, порождаемую методом i при обработке структуры G, можно рассматривать как мнение i-го эксперта. Набор ранжировок P_i, $i = 1, 2, ...$ можно рассматривать как групповой профиль — множество частных мнений экспертов по поводу решения одной задачи. Требуется найти такую интегральную ранжировку P, которая в некотором заданном смысле была наилучшим образом согласована с данным групповым профилем.

В теории принятия решения разработаны различные способы группового согласования: правило Кумбса, функция Борда, метод Кемени—Снелла и др. [8,14]. Авторы планируют посвятить следующую статью применению методов группового принятия решений для решения задачи синтеза рационального упорядочения учебных курсов.

Заключение

В работе обсуждается задача рационального упорядочения модулей электронного курса. Показано, что она обладает особенностями, которые не позволяют найти решение классическими методами построения рациональных ранжировок объектов, основанными на применении алгоритмов дискретного математического программирования.

Задача синтеза рационального упорядочения учебных модулей ставится как задача поиска наилучшей аппроксимации исходной структуры предпочтений, заданной в виде четкого или нечеткого графов, в классе всех линейных порядков на множестве вершин графа. Информация для формирования графа предпочтений может быть получена опросом эксперта (экспертов) или извлечена из гипертекстовой структуры ссылок.

Рассматриваются два типа экспертных данных: четкое и нечеткое бинарные отношения предпочтения на множестве учебных модулей. Кроме того, обсуждается исходная структура предпочтений, основанная на гипертекстовой разметке модулей учебного курса. Предлагается способ сведения всех типов исходных данных к нормализованной структуре, которая имеет простую калибровку. Предложенные преобразования вносят минимальные искажения в исходные структуры и сохраняют базовые предпочтения, заданные лицом, принимающим решение.

Структуры с простой калибровкой могут быть обработаны методом Бержа, который прошел глубокую апробацию на решении экономических и организационных задач и удовлетворяет большинству аксиом рационального упорядочения.

Научную новизну работы составляют постановка задачи упорядочения учебных модулей как задачи поиска наилучшей аппроксимации графовой структуры предпочтений в классе всех линейных порядков, способ преобразования структур G_1 — G_3 к нормализованной структуре с простой калибровкой и новое применение классического методы Бержа для синтеза рациональной ранжировки множества электронных модулей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект 2014-14-579-0144).

Список литературы

1. **Белоус В. В., Смирнова Е. В.** Электронное обучение. Платформы и системы // Инженерный вестник: электронное научно-техническое издание. 2013. № 7. С. 501—512. URL: http://engbul.bmstu.ru/doc/654234.html (дата обращения 01.07.2015).

2. **Галямова Е. В.** Оценка качества электронного учебного материала // Международная научно-метод. конф. "Управление качеством инженерного образования и инновационные образовательные технологии" (Москва, 28—30 октября 2008 г.): докл. Ч. 2. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 29—34.

3. **Иванников А. Д.** Тематические интернет-порталы как средство агрегации электронного контента в заданной предметной области // Информационные технологии. 2014. № 3. С. 43—48.

4. **Домников А. С., Белоус В. В.** Интеллектуальный анализ данных в электронных обучающих системах // Инженерный вестник: электронное научно-техническое издание. 2013. № 12. С. 567—586. URL: http://engbul.bmstu.ru/doc/656610.html (дата обращения 01.07.2015).

5. **Домников А. С., Белоус В. В.** Рациональное упорядочение модулей учебного курса // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 192—205. DOI: 10.7463/0514.0710096

6. **Домников А. С., Белоус В. В.** Рациональное упорядочение модулей учебного курса на основе нечеткой исходной информации // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 4. С. 215—227. DOI: 10.7463/0415.0765620

7. **Adam F., Humphreys P.** Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies // Information Science Reference, 2008. P. 114—152.

8. **Алескеров Ф. Т., Хабина Э. Л., Шварц Д. А.** Бинарные отношения, графы и коллективные решения. М.: Издательский дом ГУ ВШЭ, 2006. 301 с.

9. **Ларичев О. И.** Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2002. 392 с.

10. **Белкин А. Р., Левин М. Ш.** Принятие решений: Комбинаторные модели аппроксимации. М.: Наука, 1990. 160 с.

11. **Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Лань, 2002. 736 с.

12. **Юдин Д. Б.** Вычислительные методы теории принятия решений. М.: Наука, 1989. 320 с.

13. **Абаев Л. Ч.** Экспертное упорядочение альтернатив в задачах большой размерности // Управление большими системами: сб. тр. Вып. 40. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 5—34.

14. **Баллод Б. А., Елизарова Н. Н.** Методы и алгоритмы принятия решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2009. 224 с.

A. S. Domnikov, Associate Professor, **V. V. Belous,** Associate Professor, walentina.belous@bmstu.ru
Moscow State Technical University n.a. N. E. Bauman, Moscow, Russia

Synthesis of Rational Taught Modules Ordering by Berzha's Method

The work considers a problem of creating a rationally ordered electronic course modules. Features of this task are investigated and the conclusion is drawn that it is impossible to solve it by classical methods of mathematical programming and mathematical statistics. The expert poll or data included in hypertext structure of links provides initial information for the synthesis of a rational order of the taught modules. The paper considers two types of expert information: clear and fuzzy binary relations of preference based on a set of the taught modules. It offers to reduce all three structures to the normalized view, i.e. a matrix of paired comparisons with simple calibration. The proposal is to solve a problem of ordering by Berzha's method, which has received wide practical approval in a diversity of applied fields.

Keywords: *electronic course, ordering, theory of decision-making, binary*

References

1. **Belous V. V., Smirnova E. V.** Ehlektronnoe obuchenie. Platformy i sistemy (-learning. Platforms and systems), *Inzhenernyj vestnik: ehlektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie*, 2013, no. 7, pp. 501—512. URL: http://engbul.bmstu.ru/doc/654234.html (data obrashcheniya 01.07.2015) (in Russian).

2. **Galyamova E. V.** Ocenka kachestva ehlektronnogo uchebnogo materiala (The assessment of quality of e-learning material). *Mezhdunarodnaya nauchno-metodicheskaya konferenciya "Upravlenie kachestvom inzhenernogo obrazovaniya i innovacionnye obrazovatel'nye tekhnologii"* (Moscow, 28—30 oktyabrya 2008 g.): dokl. CH. 2. M.: MGTU im. N.EH. Baumana, 2008, pp. 29—34 (in Russian).

3. **Ivannikov A. D.** Tematicheskie internet-portaly kak sredstvo agregacii ehlektronnogo kontenta v zadannoj predmetnoj oblasti (Thematic the Internet-portals as means of aggregation of an electronic content in the set subject domain), *Informacionnye tekhnologii*, 2014, no. 3, pp. 43—48 (in Russian).

4. **Domnikov A. S., Belous V. V.** Intellektual'nyj analiz dannyh v ehlektronnyh obuchayushchih sistemah (Intelligent data analysis in e-learning systems), *Inzhenernyj vestnik: ehlektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie*, 2013, no. 12, pp. 567—586. Rezhim dostupa: http://engbul.bmstu.ru/doc/656610.html (data obrashcheniya 01.07.2015) (in Russian).

5. **Domnikov A. S., Belous V. V.** Racional'noe uporyadochenie modulej uchebnogo kursa (Rational orderliness of study course modules), *Nauka i obrazovanie*. MGTU im. N. EH. Baumana. EHlektron. zhurn., 2014, no. 5, pp. 192—205. DOI: 10.7463/0514.0710096 (in Russian).

6. **Domnikov A. S., Belous V. V.** Racional'noe uporyadochenie modulej uchebnogo kursa na osnove nechetkoj iskhodnoj informacii (Fuzzy Input Information-based Rational Ordering of Curriculum Modules), *Nauka i obrazovanie*, MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn., 2015, no. 4, pp. 215—227. DOI: 10.7463/0415.0765620 (in Russian).

7. *Adam F., Humphreys P.* Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies, *Information Science Reference*, 2008, pp. 114—152.

8. **Aleskerov F. T., Habina Eh. L., Shvarc D. A.** *Binarnye otnosheniya, grafy i kollektivnye resheniya* (Binary Relations, Graphs and Group Actions). Moscow: Izdatel'skij dom GU VSHEH, 2006. 301 p. (in Russian).

9. **Larichev O. I.** Teoriya i metody prinyatiya reshenij (Theory and methods of decision-making). Moscow: Logos, 2002. 392 p. (in Russian).

10. **Belkin A. R., Levin M. Sh.** *Prinyatie reshenij: Kombinatornye modeli approksimacii* (Decision making: combinatorial models of approximation of information). Moscow: Nauka, 1990. 160 p. (in Russian).

11. **Faddeev D. K., Faddeeva V. N.** *Vychislitel'nye metody linejnoj algebry* (Computational methods of linear algebra). Moscow: Lan&apos, 2002. 736 p. (in Russian).

12. **Yudin D. B.** *Vychislitel'nye metody teorii prinyatiya reshenij* (Computational methods of decision-making theory). Moscow: Nauka, 1989. 320 p. (in Russian).

13. **Abaev L. Ch.** Ehkspertnoe uporyadochenie al'ternativ v zadachah bol'shoj razmernosti (Expert ranking of alternatives in the problems of big dimension), *Upravlenie bolshimi sistemami*: sb. tr., Vyp. 40. Moscow: IPU RAN, 2012, pp. 5—34. (in Russian)

14. **Ballod B. A., Elizarova N. N.** *Metody i algoritmy prinyatiya reshenij v ehkonomike* (Methods and algorithms for decision making in economy). Moscow: Finansy i statistika, 2009, 224 p. (in Russian).