УДК 519.14(075) DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-21-31

М.В. Князева, А.В. Боженюк, И.Н. Розенберг

МЕТОД И АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО КОНЕЧНОГО АВТОМАТА*

Рассматривается задача планирования, как важная оптимизационная задача, стоящая перед многими транспортными и роботизированными приложениями. Для решения задач планирования подходы основаны на методах оптимизации, методах выборки и дискретизации (sampling-based methods), и обычно такого рода задачи являются NP-трудными и многомерными. В данной статье разработан метод планирования и составления расписаний на основе нечеткой модели конечного автомата. Дано нечеткое графовое представление задачи составления расписания и планирования операций. В работе приведены два подхода к формальной постановке задачи планирования с ограниченными ресурсами и временными переменными: ориентированный на состояния (с переходами между состояниями), ориентированный на темпоральное упорядочивание (на временной шкале). Темпоральное моделирование для задач планирования подразумевает качественный подход к управлению распределением операций или топологическим упорядочением, а также количественный подход к обработке неточных длительностей, взаимосвязей между операциями по многочисленным параметрам. Введены понятия нечетких интервалов и нечетких отношений для планирования операций на графе. Разработан алгоритм планирования, основанный на основе теории автоматов и темпоральном моделировании в условиях неопределенности. Используя формализм теории автоматов, проблема планирования и нахождения оптимальных путей решается путем последовательного изменения и анализа состояний планируемой системы с использованием различных операций, пока не будет найдено решение. В работе обсуждается идея упорядоченного во времени частичного расписания, связанного с каждым состоянием планируемой системы. Предложена модель конечного автомата для системы планирования в условиях неопределенности. Разработан метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений. Недетерминированные вычисления для задачи планирования представляют собой дерево решения, корень которого соответствует началу процесса планирования, а каждая точка ветвления в дереве соответствует точке вычисления, в которой у машины есть несколько вариантов выбора.

Автоматическое планирование; нечеткий граф; темпоральное моделирование; нечеткий автомат; операционное планирование.

M.V. Knyazeva, A.V. Bozhenyuk, I.N. Rosenberg

METHOD AND ALGORITHM FOR OPERATION PLANNING BASED ON FUZZY FINITE AUTOMATA MODEL

In this paper the planning and scheduling problem as an important optimization problem in many transportation and robotic applications is discussed. To solve planning problems, the main approaches are based on optimization methods, sampling-based methods, and usually such kinds of problems are NP-hard and high dimensional. In this work, the method for planning and scheduling based on the fuzzy finite state machine model is developed. Fuzzy graph presentation of the scheduling problem and operation planning is given. The paper presents two approaches to the formulation of the planning problem with limited resources and temporal variables: state-oriented (with transitions between states), temporal ordering-oriented (on a time scale). Temporal modeling for planning problems implies a qualitative approach to managing the distribution of operations or topological ordering, as well as a quantitative approach to handling imprecise durations,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00197.

relationships between operations in multiple parameters. The concepts of fuzzy intervals and fuzzy relations are introduced for planning operations on a graph. A planning algorithm based on the theory of automata and temporal modeling under uncertainty has been developed. Using this formalism, a path planning problem is solved by successively altering a state using various operations until a solution is found. The idea of temporal-ordered partial schedule associated with the planning state of the system is discussed. A model of a finite automaton for a planning system under conditions of uncertainty is proposed. A method and algorithm for scheduling operations based on a non-deterministic finite automaton and an enumeration scheme have been developed. The non-deterministic computation for a scheduling problem is a decision tree whose root corresponds to the beginning of the scheduling process, and each branch point in the tree corresponds to a computation point at which the machine has multiple choices. And the finite state machine model (automata) for the planning system under uncertainty is suggested.

Planning and Scheduling; fuzzy graph; temporal modeling; fuzzy finite state machine; operation planning.

Введение. Принятие решений в автоматическом планировании и управлении предполагает решения по поводу действий или операций, которые необходимо спланировать и выполнить для достижения целевых показателей. Этот процесс предполагает обоснование таких решений как: какова последовательность операций и их оценочная продолжительность; как выполнять операции в соответствии со временными ограничениями и ограничениями на используемые ресурсы; какова конечная целевая функция? Кроме того, такая постановка задачи является значимой в заданном оптимизационном контексте и в соответствии с изменениями в среде, вызванными неопределенностью при операционном планировании. Таким образом, различные допущения могут иметь место в связи с непредсказуемой динамикой среды, обозреваемостью событий, нечеткостью переменных в математической модели и, наконец, в том способе описания темпоральных переменных и параллелизме некоторых операций. Неточность в задачах принятия решений предполагает оценку текущего состояния моделируемой системы в течение процесса выполнения. Темпоральный аспект и параллелизм может быть смоделирован с помощью топологического упорядочивания событий или операций с учетом сроков выполнения проекта, отношений предшествования и ресурсного потребления для выполнения операций.

Планирование можно рассматривать как решенную проблему для малоразмерных пространственных задач и простых систем. Существуют различные подходы, и вычислительные алгоритмы для их решения. Проблемы же возникают в многомерных или динамически ограниченных областях, темпоральных задачах. Таким образом, в литературе часто предлагаются различные методы декомпозиции, позволяющие упростить задачу и сначала решить частные ограниченные подзадачи, а затем использовать их решение в качестве руководства для более сложной комплексной задачи.

Ряд работ был посвящен темпоральному обоснованию (изменению среды, событий, выполнению операций), например, качественный подход был представлен в работе Аллена [1–3], логика первого порядка была разработана Drew McDermott [4] и позволяла учитывать события и планы в их причинной связи, изменениях и отношениях между элементами модели. Ряд таких работ положили основу применению машин темпорального вывода или машин временного вывода, которые фиксируют в памяти различные «карты» временных рядов, по одному на дискретный момент времени. Книга по Темпоральному Обоснованию в Искусственном Интеллекте поднимает вопрос временной гранулярности, модального разнообразия темпоральной логики и вычислительной сложности таких задач [5]. Формальная дискуссия по вопросам темпоральных сетей была поднята в работе Ghallab et al. в главе 13 [6] и книге автора Bartak et al. [7]. Автор Dechter и другие соавторы предложили фреймворк, который называется задача удовлетворения темпоральных ограничений – temporal constraint satisfaction problem (TCSP), в которой переменные представляли собой моменты времени, а темпоральные знания были представлены в виде ограничений или допустимых интервалов; авторы в своей работе также предложили алгоритмы согласованности пути [8].

Представление переменной состояния задачи планирования. В автоматизированном планировании обычно используются некоторые формальные обозначения или область планирования для введения описательной модели. Описательная модель использует формальный аппарат конечного автомата (finite-state machine) и классические допущения сетевого планирования, такие как: требование конечности множеств состояний и операций; дискретная последовательность состояний и операций, подлежащих планированию; определенное предсказание того, в каком состоянии будет система, если действие $\boldsymbol{a}$ будет выполнено в состоянии $\boldsymbol{s}$. Конечный автомат оперирует состояниями, правилами перехода из одного состояния в другое и зависит от применяемых входных и выходных данных.

Рассмотрим формулировку модели системы переходов состояний и некоторые вычислительные аспекты ее использования для задачи планирования.

Определение 1. Система перехода состояний или область планирования представляет собой 4-кортеж $\Sigma = (S, O, \gamma, cost)$ где:

S – конечное множество состояний системы, или частичные упорядоченные темпоральные планы;

O – конечное множество операций для выполнения;

γ – функция переходов состояний, которое дает следующее состояние или набор возможных состояний системы после того, как действие или операция будет выполнена, $S \times A \to S$ с $\gamma(s,a)$ является предсказуемым выходом.

Cost – частичная функция стоимости или затрат, $S \times A \to [0, \infty)$ имеет таккую же область определения как и γ. Функция стоимости или затрат может представлять денежные затраты, время или другие ресурсы, которые необходимо минимизировать.

Приведенное выше определение функции переходов состояний было дано для общего случая детерминированного конечного автомата, однако на практике в планировании могут возникать несколько вариантов дальнейших состояний в дискретный момент времени t. Таким образом, каждый уровень ветвления **g** будет соответствовать точке вычисления, в которой машина имеет несколько вариантов выбора. А функция переходов состояний в недетерминированном конечном автомате будет иметь следующий вид: $\gamma : S \times A \to Pos(S)$, таким образом γ возвращает множество состояний. Основной особенностью нечеткого конечного автомата (Fuzzy Finite State Automata - FFSA) является то, что переходы из состояния в состояния вызваны не точными событиями, а нечеткими переменными, таким образом, что сами переходы становятся неточными, неявно заданными. Для системы планирования в любой дискретный момент времени, сама система необязательно находится в одном единственном предопределенном состоянии, а может находиться в нескольких состояниях, каждое из которых ассоциировано с функцией принадлежности (уверенности). Каждое состояние системы S является ассоциированным с нечетким состоянием операции: $\mu S \in [0,1]$, которое представляет собой степень нахождения в этом состоянии, то есть, 1 – для всех активных приемлемых состояний, 0 – для всех других неприемлемых состояний. Для зависимых от темпоральных переменных FFSA, переходы состояний могут иметь место в тот момент, когда входные данные изменяются во времени динамически.

Также принято представлять каждое состояние $s \in S$ для системы планирования в виде набора признаков (свойств) и определять набор операторов, которые можно использовать для вычисления переходов между состояниями. Способ оценки каждого состояния и указания членов состояний для множества S состоит в том, чтобы сформулировать набор ограничений непротиворечивости, поэтому этот набор играет роль ограничений возможных комбинаций присвоений переменных и проверки функции перехода состояний.

Определение 2. Пусть R и X – наборы *отношений* и *переменных состояния* над набором объектов B, а S – пространство состояний переменных состояния над X. Шаблон действия (операторы планирования или схемы действий) для S – это кортеж *α = (head(α); pre(α); eff(α); cost(α))*, где *head(α)* – это множество синтаксических выражений (операторов планирования); $pre\ (\alpha)\{p_1, \dots, p_m\}$ – это набор предусловий, $eff\ (\alpha)\{e_1, \dots, e_n\}$ – множество эффектов от состояния; *cost(α)* обозначает стоимость или затраты от действия (выполнения операции) [9].

Определение 3. *Планом или частичным расписанием называется* конечная упорядоченная во времени последовательность операций, которая выполняется следующим образом: $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ и общая суммарная стоимость такого плана это: $cost(\pi) = \sum_{i=1}^{n} cost(o_{it})$.

Определение 4. Упорядоченное во времени частичное расписание для набора операций $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ является применимым для оценки состояния s_0 если существуют такие состояния $s_1, s_2, \dots, s_n$ что: $\gamma(s_{i-1}, o_i) = s_i$ for $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, мы можем определить ряд состояний, связанных с упорядоченными во времени частичными расписаниями, следующим образом:

$$\gamma(s_0, \pi) = s_n; \tag{1}$$

$$\hat{\gamma}(s_0, \pi) = \langle s_0, s_1, \dots, s_n \rangle. \tag{2}$$

В терминах дискретной математики $\hat{\gamma}$ является транзитивным замыканием для γ. Если определенная операция o не применима для состояния s в дискретный момент времени t, тогда $\gamma(s, o)$ не определено. Если операция o применима для состояния s в дискретный момент времени t, тогда:

$$\gamma(s_t, o)(x) = \begin{cases} w, \text{if } eff(o) \text{ contains an effect } x \leftarrow w, \\ \qquad s_t(x), \text{otherwise}, \end{cases} \tag{3}$$

где x – это переменная состояния из множества X.

В задачах планирования с ограниченными ресурсами (Resource-Constrained Scheduling Problems – RCSP) подзадача темпорального моделирования обычно предполагает минимизацию темпоральных переменных, ограничений и целевой функции. Операции необходимо планировать и выполнять в течение дискретных периодов времени (или нечетких интервалов) с учетом сроков и ограничений на использование ресурсов. Такого рода цели определяют окончательные решения для частичных или полных темпоральных расписаний, они называются *целевыми состояниями*.

Определение 5. Задача планирования с *переменной состояния* представляет собой тройку $P = (\Sigma, s_0, g)$, где Σ - является областью планирования с переменным состоянием, s_0 - начальное плановое состояние системы, and g - множество целевых показателей для системы.

Любое допустимое решение, частичный темпоральный план (partial temporal-scheduled plan) должен удовлетворять следующему условию: решением для P является любой план выполнения операций, которые должны быть расположены на временной шкале $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ таким образом, что: состояние $\gamma(s_0, \pi) = s_n$ должно удовлетворять цели g и $\gamma(s_0, \pi) \in S_g$, где S_g – множество целевых состояний планируемой системы. Любое такое решение может быть минимальным по количеству операций, кратчайшим по времени или оптимальным по стоимости. Выполнение операций также может иметь перекрытия во времени, если их условия, режимы выполнения и ресурс-эффекты независимы. Цели, как правило, ограничены сроками и стоимостью проекта.

Темпоральное моделирование для задач планирования подразумевает качественный подход к управлению распределением операций или топологическим упорядочением, а также количественный подход к обработке неточных длительностей, взаимосвязей между операциями по многочисленным параметрам. Формальная постановка задачи с временными переменными для задачи планирования с ограниченными ресурсами может быть как *ориентированной на состояния* (с переходами между состояниями), так и *ориентированной на темпоральное упорядочивание* (на временной шкале).

В следующем разделе обсуждается ориентированный на время метод моделирования, который использует интервалы в качестве временных примитивов и учитывает как качественные, так и количественные отношения между операциями в дискретные моменты времени.

Темпорально-ориентированное представление задачи планирования. Нечеткие интервалы и нечеткие отношения. Рассмотрим количественную дискретную модель, описываемую набором темпоральных переменных, например, $t_1, t_2, \dots, t_n$ и каждая переменная обозначает момент времени. Интервальная переменная характеризуется парой $[t_1, t_2]$ такой что: $t_1 < t_2$ и их длительности являются положительными числами.

Определение 6. *Нечеткий интервал* $\tilde{I}(\cdot)$ и функция принадлежности $\mu_I(\cdot)$ представляет собой нечеткое подмножество, если выполняются следующие условия: $\forall(x, y, z) \in \Re$, $z \in [x, y]$, и $\mu_I(z) \geq \min(\mu_I(x), \mu_I(y))$ [10, 11]. Таким образом, нечеткий интервал в задаче планирования – это нечеткое множество на временном интервале, чье лево- и правосторонние (L-R) α-срезы являются интервалами, и каждая переменная состояния *x(t) – это функция на временном интервале.*

Нечеткий интервал может быть так же определен с помощью упорядоченной пары L-R интервалов $(\tilde{l}^-, \tilde{r}^+)$, где $\tilde{l}^-$ является нечеткой нижней границей и $\tilde{r}^+$ называется нечеткой верхней границей, а $A_{\widetilde{M}}$ является функцией присваивания [12]. С темпоральной точки зрения переменная состояния **x** может быть охарактеризована своим постоянством (*persistence*) или изменением (*change*) в рамках нечеткого временного утверждения.

Постоянство на интервале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x = v$ обозначает, что $x(\tilde{t}) = v$ для каждого момента $\tilde{t}$ в темпоральном интервале $\tilde{t}_1 \leq \tilde{t} \leq \tilde{t}_2$.

Изменение на интервале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x: (v_1, v_2)$ показывает, что значение переменной состояния x изменяется на нечетком интревале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]$ следующим образом: от $x(\tilde{t}_1) = v_1$ до $x(\tilde{t}_2) = v_2$ с $v_1 \neq v_2$.

Рис. 1 иллюстрирует временную шкалу для постоянства переменной состояния x, где интервал соответствует $[\tilde{t}_2, \tilde{t}_3]$.

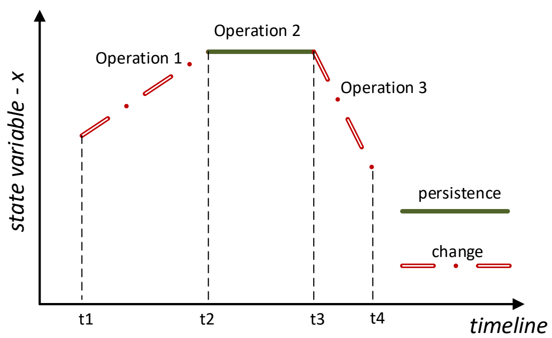

Рис. 1. Временная шкала для переменной состояния x в задаче планирования

Например, утверждение $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x$: $(operation\ 1)$ иллюстрирует, что для переменной состояния x профиль ресурсов, необходимый для выполнения операции 1, может меняться со временем. Точные четкие моменты этого изменения не зафиксированы на графике, но на рис. 1 видно, что значения переменной состояния *x* для *операции 1* и интервала времени $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]$ изменяются и могут быть инициализированы на моменте исполнения самой операции. Этот вид неопределенности также может быть устранен с помощью нечетких интервалов. Временные утверждения на временной шкале и их экземпляры имеют смысл в соответствующих областях планирования и отражают возможную эволюцию переменной состояния x.

Определение 7. *Интервальное упорядочение* ряда нечетких временных интервалов $[\tilde{t}_i, \tilde{t}_j]$ на временной шкале - это частичный порядок (график) или последовательность упорядоченных во времени интервалов выполнения операций, которые должны быть запланированы с учетом отношений предшествования, функции стоимости и отношений «окончание-начало».

Определение 8. *Нечеткое отношение* $\tilde{R}$ это отображение из декартова пространства $X_1 \times X_2$ на интервал [0,1], где сила такого отображения выражается с помощью функции принадлежности отношения $\mu(x, y)$. Нечеткое темпоральное отношение показывает степень наличия или отсутствия связи между элементами двух или более нечетких интервальных множеств.

Наиболее традиционным четким методом формализации качественных отношений между интервалами, зависящими от времени, является интевальная алгебра Аллена: Allen's Interval Algebra, or Interval Algebra (IA) [2]. Аллен ввел 13 зависящих от времени отношений между четкими интервалами от начала до конца, которые можно применять при планировании отношений предшествования между операциями следующим образом: до, после, встречает (встречается), перекрывает (перекрывается), в течение (включает), начинает (начинается), заканчивает (заканчивается) и равно [12].

Рассмотрим следующий пример. Пусть даны два множества: $X_1 = \{o_1, o_2, \dots, o_5\}$ четкие операций и $\tilde{X}_2 = \{\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_5\}$ нечеткие временные длительности операций (интервалы), и соответствующие отношения $R(X_1, \tilde{X}_2) = \{(o_1, \tilde{d}_2), (o_3, \tilde{d}_4), (o_4, \tilde{d}_1), (o_5, \tilde{d}_3)\}$ между ними. Такой тип отношений является бинарным и состоят из упорядоченных пар $(o_i, \tilde{d}_j)$; и соответствующих функций принадлежности $\mu_R(o_i, \tilde{d}_j)$, такой тип нечетких отношений может быть представлен в трехмерном пространстве (рис. 2).

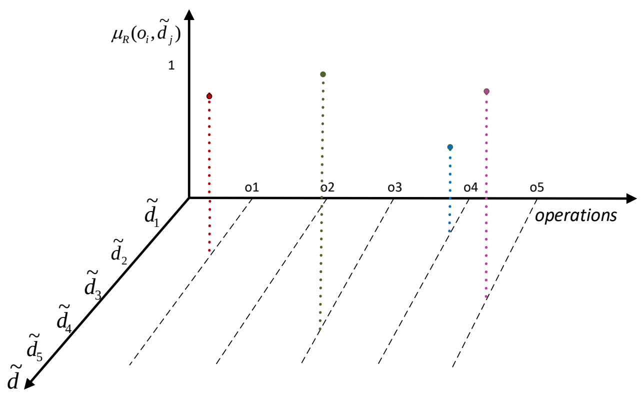

Рис. 2. Трехмерное представление нечетких отношений между операциями и их длительностью выполнения

Нечеткое *n*-арное отношение $\tilde{R}$, определенное на области $X = X_1 \times \ldots \times X_n$, это упорядоченный набор кортежей из n-элементов следующим образом:

$$\tilde{R} = \{((x_1, \ldots, x_n), \mu_R(x_1, \ldots, x_n)) | (x_1, \ldots, x_n) \in X\}, \tag{4}$$

где $\mu_R(x_1, \ldots, x_n): X_1 \times \ldots \times X_n \to [0,1]$ это функции принадлежности над отношением R, которые отображают домен на непрерывный интервал [0,1].

Проблема упорядочения интервалов при составлении расписаний и планировании может рассматриваться как частный случай задачи геометрии интервальных расстояний (*interval distance geometry problem – iDGP)*, где расстояния не заданы точно. Основная проблема геометрии расстояний, как задачи принятия решений, состоит в оценке измерений попарных расстояний между элементами в некотором множестве и вычислении координат этих точек.

В следующем разделе обсуждается нечеткое графовое интервальное представление задачи планирования и системы переходов состояний, которое позволяет оценить текущий этап планирования и частичный план на его операционном этапе выполнения.

Представление нечеткого графа для задачи планирования с интервальными значениями переменных. Рассмотрим связанный нечеткий граф $G = (V, E, \tilde{d})$, где $\tilde{d}: E \to \mathbb{R}_+$ это нечеткие положительные веса на ребрах и целью является цель состоит в том, чтобы найти вложение вершин V в евклидово пространство $V \to \mathbb{R}^K$, таким образом, что: для каждого ребра $\{u, v\}$ следующее выражение истинно:

$$\forall \{u, v\} \in E \ \ \|x_u - x_v\| = \tilde{d}_{uv} \, . \tag{5}$$

В задачах планирования и составления расписаний продолжительность операций обычно определена неточно из-за характера процесса планирования, а интервально представленная задача может быть выражена следующим образом. Для данного положительного целого числа K и интервально-взвешенного нечеткого графа $G = (V, E, \tilde{d})$, где нечеткие длительности ассоциированы с ребрами $\{u, v\} \in E$ и положительными интервальными весами $[\underline{d}(\{u, v\}), \overline{d}(\{u, v\})]$, задача геометрии расстояний - это задача построения графа G, отображающего $x: V \to \mathbb{R}^K$ и удовлетворяющего интервальным расстояниям и отношениям предшествования:

$$\underline{d}(\{u, v\}) \leq \|x_u - x_v\| \leq \overline{d}(\{u, v\}), \ \forall \{u, v\} \in E, \tag{6}$$

где $\|\cdot\|$ обозначает Евклидову норму.

Каждый дискретный момент связан с частичным расписанием (количеством выполняемых операций) и соответствует определенному состоянию S^t планируемой системы, рис. 3.

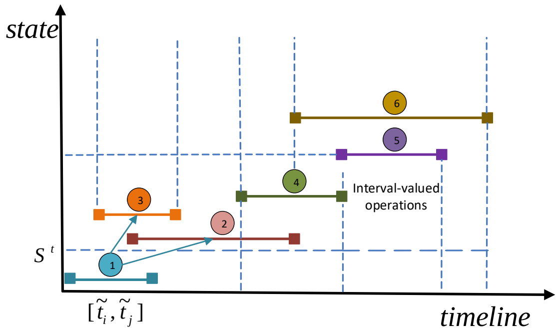

Рис. 3. Интервальное представление нечетких отношений предшествования между операциями, длительностью и состояниями системы планирования

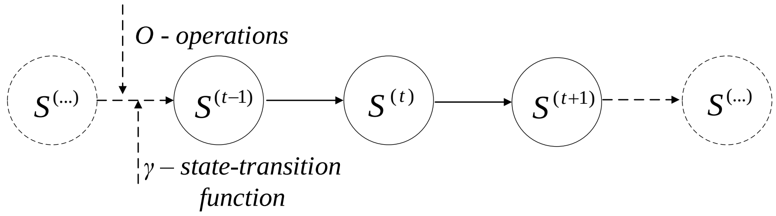

Рис. 4. Схема планирования, ориентированная на переходы состояний

Рис. 4 иллюстрирует схему, ориентированную как *на состояния (с переходами между состояниями)*, так и *на темпоральное упорядочивание (на временной шкале)*, где каждый узел представляет собой состояние в каждый момент времени t и операции, которые необходимо выполнить, чтобы система перешла в следующее состояние в $t+1$ момент [13, 14]. Функция перехода γ представляет следующее состояние, или набор возможных состояний, после того, как операция (или набор операций) будет выполнена.

Метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений. Недетерминированные вычисления в конечном автомате [15] для задачи упорядочивания операций представляют собой *дерево предшествования*, корень которого соответствует началу процесса планирования, а каждая *точка ветвления* в дереве соответствует *точке вычисления*, в которой у машины есть несколько вариантов выбора. Идея использовать схему перечислений была впервые предложена и применена к задачам планирования для подсчета перестановок с запрещенными шаблонами (permutations with forbidden patterns) [16]. Подход, основанный на схеме перечисления в планировании, можно определить как полное, упорядоченное перечисление всех операций (наборов операций) и их топологическое упорядочивание.

В данной работе разработанный алгоритм основывается на построении частичных расписаний выполнения операций и построении *дерева предшествования, в литературе – backtracking algorithm* [17]. Каждое состояние S дерева предшествования ассоциировано с точкой вычисления t_s, процедура начинается с выполнения первой фиктивной стартовой операции в момент времени 0 и на каждом шаге мы определяем: множество текущих завершенных операций FOP_{st}; множество приемлемых для планирования операций EOP_{st} для выполнения в каждый момент времени $t+1$, то есть, тех операций, чьи предшественники уже были выполнены согласно отношениями предшествования; множество операций, которые находятся в процессе выполнения OIP_{st} в момент времени t.

После старта, текущее частичное расписание оценивается и расширяется путем добавления для выполнения операций из подмножества *приемлемых операций* (или так называемое, подмножество расширенных альтернатив EA_{st} с учетом требований к ресурсам) в точке вычисления.

Введем следующие обозначения для построения алгоритма:

S_t – текущее состояние системы, ассоциированное с частичным расписанием в момент времени t;

$SofMO_s$ – множество способов выполнения работы в зависимости от требуемого уровня ресурсов для определенного s-состояния (в литературе multi-mode execution [18–20]); $\tilde{s}_{is}(\cdot), \tilde{c}_{is}(\cdot)$ – начальные и конечные интервальные значения для выполнения операции i, где $\tilde{c}_i(\cdot) = \tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_i(\cdot)$; $\tilde{d}_i(\cdot)$ – нечеткая длительность выполнения операции i.

Для каждого текущего состояния $\boldsymbol{s}$ мы определяем новую точку вычисления t и определяем множество приемлемых операций. Затем определяем способы выполнения приемлемых операций $SofMO_s$, и после выбора способа выполнения для каждой операции MO_s, вычисляем EA_{st}.

Step 1: Initialization.
Set $s{:=}0;$ dummy source operation $i_1{=}0;\ \tilde{t}_0{:=}0;\ \tilde{s}_0{=}0;\ OIP_{st}{:=}\{0\};\ FOP_{st} = \emptyset$;
m_0:=1; $EOP_{st} \coloneqq \emptyset$.
Step 2: Compute new decision point state and eligible operations.
Increase state $s{=}s{+}1;\ \tilde{t}_s \coloneqq \min\{\tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_i(\cdot) | i \in OIP_{s-1,t}\}$;
$FOP_{st}{:}= FOP_{s-1,t} \cup \{i \in OIP_{s-1,t} | \tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_{im}(\cdot) = \tilde{t}_s\}$;
$EOP_{st} \coloneqq \{i \in \{1, \dots, i+1\} \setminus (FOP_{st} \cup OIP_{s-1,t}) | \rho \subseteq FOP_{st}\}$;
$OIP_{st} \coloneqq OIP_{s-1,t} \setminus FOP_{st}$;
if $i + 1 \in EOP_{st}$, then store current solution and go to step 7.
Step 3: Compute mode alternatives.
If $EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t} = \emptyset$, then $SofMO_s \coloneqq \emptyset$ and go to step 5,
else $SofMO_s \coloneqq SetofModeAlternative(EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t})$.
Step 4: Select next mode alternative.
if no untested mode alternative is left in $SofMO_s$
then go to step 7,
else select untested $MO_s \in SofMO_s$;
for each $i \in EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t}$ update $m_i \coloneqq MO_s(i)$;
if a non-renewable resource conflict occurs,
then go to step 4.
Step 5: Compute extension alternative.
$EA_{st} \coloneqq SetofExtensionAlternatives(EOP_{st}, OIP_{st})$.
Step 6: Select next extension alternative.
if no untested extension alternative is left in EA_{st},
then go to step 4,
else select untested alternative in EA_{st}, $OIP_{st} \coloneqq OIP_{st} \cup EA_{st}$;
for each $i \in EA_{st}$ update $\tilde{s}_i(\cdot) \coloneqq \tilde{t}_s$; go to step 2.
Step 7: Backtracking.
$s{:=}s{-}1;$ if $s{=}0$ then $STOP$, else $OIP_{st} \coloneqq OIP_{st} \setminus EA_{st}$;
go to step 6.

Имея дискретную последовательность состояний, временные ограничения, отношения предшествования между операциями, задача планирования может быть решена с помощью алгоритма планирования для s-состояний. Для каждого состояния схемы перечисления этот алгоритм оценивает все возможные частичные расписания и сохраняет текущее решение до тех пор, пока не будут запланированы все операции.

Заключение. В статье предложена описательная модель, ориентированная на состояние планируемой системы и темпоральные переменные для обработки ограничений и неопределенности для задачи автоматического планирования и составления расписаний. Основная идея статьи состоит в том, чтобы показать, как темпоральный контекст и модель конечного автомата могут быть применены к системе планирования в рамках качественного и количественного подходов. В статье представлены нечеткое графовое интервальное представление задачи планирования, система переходов состояний, а так же метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Allen J., Kautz H., Pelavin R., and Tenenberg J*. Reasoning about Plans. Morgan Kaufmann, 2014.
2. *Allen J.F.* Maintaining knowledge about temporal intervals, *Communications of the ACM*. – 1983. – Vol. 21 (11). – P. 832-843.
3. *Allen J.* Planning as temporal reasoning, *In Proc. Intl. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR). San Mateo: Morgan Kaufmann, 1991*, pp. 3-14,
4. *McDermott D.* A temporal logic for reasoning about processes and plans, *Cognitive Science*, 1982, Vol. 6, pp. 101-155.
5. *Fisher M., Gabbay Dov M., and Vila L*. Handbook of Temporal Reasoning in Artificial Intelligence, Vol. 1, Elsevier, 2005.
6. *Ghallab M., Nau D.S., and Traverso P.* Automated Planning: Theory and Practice. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, Amsterdam, 2004.
7. *Bartak R., Morris R., and Venable B*. An Introduction to Constraint-Based Temporal Reasoning. Morgan&Claypool, 2014.
8. *Dechter R., Meiri I., and Pearl J.* Temporal constraint networks, *Artificial Intelligence*, 1991, Vol. 49, pp. 61-95.
9. *Ghallab M., Nau D., Traverso P*. Automated Planning and Acting. Cambridge University Press, 2016.
10. *Fortin J., Dubois D., Fargier H*. Gradual Numbers and Their Application to Fuzzy Interval Analysis, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, Vol. 16 (2), pp. 388-402.
11. *Dubois D., Kerre E., Mesiar R., Prade H*. Fuzzy Interval Analysis, In: Dubois D., Prade H., Eds., Fundamentals of Fuzzy Sets, pp. 483-581, The Handbooks of Fuzzy Sets Series, Vol. 7. Springer, 2000
12. *Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U.* Fuzzy Temporal Graphs and Sequence Modelling in Scheduling Problem, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1239, pp. 539-550.
13. *Kacprzyk J., Knyazeva M., Bozhenyuk A*. Fuzzy Interval-Valued Temporal Automated Planning and Scheduling Problem, *Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, 2021, Vol. 362, pp. 51-58.
14. *Knyazeva M., Bozhenyuk A., Bozheniuk V*. Unfolding Fuzzy Temporal Computational Graph for Project Scheduling Problem, *Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, 2021, Vol.307, pp. 615-622.
15. *Sipser M.* Introduction to the Theory of Computation. Cengage Learning, 2012.
16. *Zeilberger D.* Enumeration Schemes and, more importantly, their automatic generation, *Annals of Combinatorics*, 1998, 2, pp. 185-195.
17. *Patterson J.H., Talbot F.B., Slowinski R., Węgłarz* J. Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems, *European Journal of Operational Research*, 1990, Vol. 49, Issue 1, pp. 68-79.
18. *Hartmann S*. Project Scheduling under Limited Resources, Models, Methods, and Applications, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 1999, Vol. 478.
19. *Cheng J., Fowler J., Kempf K., Mason S*. Multi-mode resource-constrained project scheduling problems with non-preemptive activity splitting, *Computers &Operations Research*, 2015, Vol. 53, pp. 275-287.
20. *Reyck B.D., Herroelen W*. The multi-mode resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations, *European Journal of Operational Research*, 1999, Vol. 119, pp. 538-556.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Князева Маргарита Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371743; к.т.н.; доцент.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; д.т.н.; профессор.

Розенберг Игорь Наумович – Научно-исследовательский институт автоматизации, информатизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»); e-mail: avb@itt.net.ru; г. Москва, Россия; научный руководитель АО «НИИАС»; д.т.н.; профессор.

Knyazeva Margarita Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371743; cand. of eng. sc.; associate professor.

Bozhenyuk Aleksander Vitalievich – e-mail: avb002@yandex.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Rozenberg Igor Naumovich – Public corporation “Research and development institute of railway engineers”; e-mail: avb@itt.net.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.315.611 DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-31-46

Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Статья посвящена исследованиям вопросов оценки воздействующих факторов и прогнозирования электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режимов ее эксплуатации. Проведен анализ существующих методов прогнозирования энергопотребления. Обоснован выбор метода прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети. Рассмотрен алгоритм создания нейросети для краткосрочного прогноза электрической нагрузки. Актуальность работы обусловлена требованиями действующего законодательства к прогнозированию электропотребления для решения задачи поддержания баланса мощностей между генерирующей стороной и потреблением электрической энергии. При этом одной из основных задач, связанных с генерацией электрической энергии и ее потреблением, является задача поддержания баланса мощностей. С одной стороны, при увеличении плановой нагрузки могут возникнуть перебои в поставке электроэнергии, с другой стороны, уменьшение электропотребления приведет так же к уменьшению КПД электростанций, и в конечном счете – к повышению стоимости на электроэнергию как для субъекта оптового рынка электроэнергии, так и для конечного потребителя. Разработанная нейросетевая модель (НС) модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных (активная и реактивная мощность, температура окружающей среды, дата и индекс дня). Полученная НС модель краткосрочного прогнозирования электропотребления участка районной электрической сети 10 кВ, учитывает факторы: – времени, – метеорологических условий, – отключений отдельных питающих линий электропередач, – режима работы потребителей электроэнергии. Получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии наружной температуры, типу дня и т.д. Модель прогнозирования величины, потребляемой активной и реактивной мощности вполне работоспособна, однако на данном этапе все еще имеет довольно высокий уровень погрешности прогнозирования. Для повышения точности прогнозирования необходимо увеличить базу данных, составляющих обучающую выборку, т.к. на данный момент имеющиеся данные охватывают временной промежуток длиной лишь 3–4 месяца. Результаты анализа показали, что наибольшие трудности вызывает прогнозирование потребления реактивной мощности.

Анализ данных; искусственные нейронные сети; прогнозирование электропотребления; набор факторов; надежность систем энергоснабжения; методы прогноза; архитектура нейронной сети.