ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Научная статья

УДК 004.04
DOI: 10.18101/2304-5728-2021-3-39-61

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ЗНАНИЙ

© Гейда Александр Сергеевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
geida@iias.spb.su

© Федорченко Людмила Николаевна
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
lnf@iias.spb.su

© Афанасьева Ирина Викторовна
кандидат технических наук, заведующая лабораторией
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук (САО РАН)
Россия, 369167, Карачаево-Черкесия, пос. Нижний Архыз
riv@sao.ru

© Хасанов Дмитрий Салимович
аспирант
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
dkhasanovsuai@yandex.ru

Аннотация. В статье предложен новый объект исследований в задачах обработки динамических знаний — динамические отношения, проявляющиеся при использовании информационных технологий в современных изменяющихся условиях, а также представлена модель, позволяющая исследовать этот объект — алгебра циклограмм. Перечислены операции с временными интервалами, теоретико-множественные и алгебраические операции над динамическими отношениями, семантические операции с циклограммами, дана краткая характеристика операций и проведен их анализ с точки зрения использования в задачах обработки знаний. Динамические отношения актуальны в прикладных задачах, в которых присутствуют разные типы ресурсов, различные политики их использования, отказы ресурсов, присутствуют потоки заявок на

использование разнородных ресурсов общего доступа; планируется сборка сложного изделия или составляется расписание. В качестве примера подробно рассмотрена система управления перевозками грузов в транспортной сети.
Ключевые слова: системы принятия решений; динамические структуры, динамические отношения; алгебра циклограмм; системы планирования; распределение ресурсов.

Благодарности. Авторы искренне благодарят профессора В. И. Городецкого за идеи и обсуждения, высказанные в статье.

Для цитирования
Гейда А. С., Федорченко Л. Н., Афанасьева И. В., Хасанов Д. С. Динамические отношения в задачах обработки знаний // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2021. № 3. С. 39–61.

Введение

Повсеместное внедрение новых информационных технологий (цифровых) в производство и другие отрасли народного хозяйства привело к актуализации и развитию ряда современных направлений исследований, связанных с разработкой систем искусственного интеллекта [1–3], задач обработки динамических знаний [4], задач выработки решений в предметных областях с динамической структурой [5–8].

Способы описания динамической структуры предметной области могут быть различными, но все они фактически представляют собой языковую или алгоритмическую форму задания системы с отношениями. Поэтому далее будем полагать, что формальное описание динамики структуры предметной области задается системой с динамическими отношениями, которые являются отношениями на множестве объектов, зависящими от времени.

Динамика структуры предметной области — это изменение структуры во времени, изменение отношений на множестве объектов, отвечающих основному множеству системы с отношениями. Например, если некоторое бинарное отношение описывается матрицей смежности, то наличие динамики означает, что эта матрица может быть различной для двух разных моментов времени.

При разработке приложений, например в контексте интернета вещей [9; 10] и киберфизических систем [11–13], динамические отношения стали еще более актуальными, чем прежде, главным образом, в задачах, в которых присутствуют разные типы общедоступных ресурсов, разные политики их использования, отказы ресурсов, потоки заявок на использование разнородных ресурсов общего доступа и т. д. В этих задачах возникает динамическая потребность (поток заявок на ресурсы разных типов от разных подсистем), временные ограничения на требуемые ресурсы (со стороны приложений), а также временная доступность ресурсов тоже динамическая (робот отказал, робот или устройство, используемое как ресурс, отправлены на техническое обслуживание и т. д.). Также широкий класс задач с динамическими отношениями возникает при анализе конфликтных ситуаций, где динамика присутствует в связи с возможным взаимодействием конфликтующих сторон [7].

1 Постановка задачи

В задаче обработки динамических знаний следует выделить два этапа, тесно взаимосвязанных по влиянию на эффективность ее решения.

Первый этап — это построение в пределах рассматриваемого интервала времени интервалов истинности и интервалов ложности для всего множества предикатов (утверждений) об объектах предметной области.

Второй этап — выработка решений напрямую: выводы о состоянии предметной области и пути достижения некоторого множества целей.

По сути, на первом этапе выбирается структура для представления информации о динамике отношений предметной области в рассматриваемом интервале времени, обеспечивающая экономное представление информации и удобство работы с ней на втором этапе. Иначе говоря, на первом этапе информация о динамических отношениях представляется в терминах специального языка, ориентированного на конкретный формализм, а на втором этапе эта информация преобразуется в терминах правил, в технике выбранного формализма.

В качестве языка описания динамических отношений и математического формализма для манипулирования с ними используется язык циклограмм (язык индикаторных функций на временной шкале (работы системы)) и соответственно алгебра циклограмм.

В качестве объекта исследования выбрана технология планирования с использованием динамических отношений, к которым добавлена интервальная алгебра временных отношений Аллена[1] [1].

В качестве экспериментов, демонстрирующих работу с алгеброй динамических отношений и интервальной алгеброй времени Аллена выбраны приложения на железнодорожном и морском транспорте. Такой выбор связан с их важностью, с актуальностью цифровизации этих систем, с опытом исследований по этой теме, с наличием необходимых сведений о функционировании таких систем. В разделе 3 демонстрируются приложения, показывающие многообразие возможных применений операций алгебры циклограмм [14–18].

Большинство таких приложений имеется в области составления расписаний, в многопроцессорных системах, где нужно распределять память и ресурс многих процессоров, в планировании сборки сложного изделия типа самолета группой роботов, в распределении разнородных ресурсов при управлении проектами — везде, где необходимо перепланирование из-за отклонений во времени выполнения отдельных операций, из-за появления срочных приоритетных заявок, из-за отказа роботов или недоступности других ресурсов, из-за ограничений на ресурсы и т. д.

[1] URL: https://wiki2.wiki/wiki/Allen%27s_interval_algebra (дата обращения: 21.08.2021).

2 Алгебра циклограмм

2.1 Понятие циклограммы

Понятие циклограммы, рассматриваемое в данной работе, имеет гораздо более широкий смысл, чем это принято считать [17]. Под этим термином понимается формальное средство для описания модели динамического отношения на концептуальном, формально-математическом, логическом и физическом уровнях. На концептуальном уровне циклограмма есть множество индикаторных функций динамического отношения на заданном наборе элементов в фиксированном интервале времени. На формально-математическом уровне циклограмма есть неделимый объект, элемент множества аналогичных объектов, на котором задан строго определенный набор операций и их свойств, образующих вместе алгебру циклограмм. На логическом уровне циклограмма — это особая структура данных, реализованная в виде файла с множеством записей.

Пусть $A_1, A_2, \ldots, A_n$ — некоторые множества и $A = A_1 \times A_2 \times \ldots \times A_n$ — их декартово произведение, R — динамическое отношение, заданное на A, $\Delta = [t_0, t_k]$ — интервал времени, на котором рассматривается R. Циклограммой отношения R (на концептуальном уровне) будем называть множество индикаторных функций отношения R на интервале Δ. При этом в циклограмме каждая индикаторная функция ставится в соответствие некоторой n-ке отношения R. Для циклограммы отношения R будем использовать обозначение CKL $R(A, \Delta)$, а если аргументы нужно указать явно, то вместо этого будем писать CKL $R(A_1, A_2, \ldots, A_n, \Delta)$.

Аналогично отношениям можно говорить об унарных циклограммах, бинарных и т. д. На рис. 1 приведен пример графического представления унарной циклограммы CKL $R(\{a_1, a_2\}, [t_0, t_k])$, на рис. 2 — пример такого же представления бинарной циклограммы CKL $R(A_1, A_2, \Delta)$ при $A_1 = \{a_1, a_2\}$ $A_2 = \{b_1, b_2\}$, $\Delta = [t_0, t_k]$. Интервалы $\Delta_1^{(1,1)}, \Delta_2^{(1,1)}, \Delta_1^{(1,2)}, \Delta_1^{(2,1)}$, на которых значение индикаторной функции равно 1 , будем называть «импульсами».

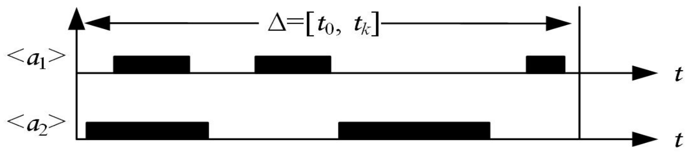

Рис. 1. Унарная циклограмма CKL $R(\{a_1,a_2\},[t_0,t_k])$

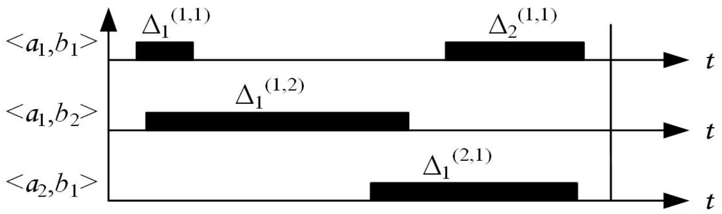

Рис. 2. Циклограмма бинарного отношения CKL $R(A_1,A_2,\Delta)$

Из определения следует, что в циклограмме можно выделить три основных элемента:

– множество n-ок (синтаксическая компонента);

– интервал времени $\Delta=[t_0,t_k]$;

– семантику отношения, задаваемую его именем и индикаторной функцией для каждой из n-ок.

Выбор этих трех компонент важен для определения и алгоритмизации множества операций с циклограммами, которые вводятся далее.

2.2 Алгебра циклограмм. Общая характеристика

Формально под алгеброй циклограмм понимается алгебраическая система

$$\upsilon=<B,\Omega>, \tag{1}$$

где B — множество циклограмм, Ω — множество операций над циклограммами, определяющее правила возможных преобразований циклограмм, правила манипуляций с циклограммами. Как уже отмечалось, алгебра циклограмм есть описание динамических отношений и их свойств на формально-математическом уровне.

Все теоретико-множественные и алгебраические операции, определенные в теории отношений, имеют смысл и для динамических отношений и потому должны быть включены в множество Ω. Однако в случае динамических отношений эти операции следует рассматривать для каждого фиксированного момента времени.

Принципиально новым моментом для динамических отношений является наличие времени как дополнительного параметра. По этой причине множество операций с ними оказывается шире, а сами операции — богаче содержательно и сложнее алгоритмически, чем в случае обычных (статических) отношений.

В данной работе не ставится задача описания всего множества возможных операций с циклограммами, анализа этого множества с позиций функциональной полноты, построения различных базовых наборов операций и т. д. Задача построения множества Ω будет рассматриваться с более прагматических позиций. В каждой конкретной задаче приходится иметь дело со специфическим набором циклограмм B, а технология решения задачи предопределяет достаточный набор операций Ω. Новые задачи могут потребовать конструирования новых операций. В этой связи в работе рассматривается описание тех операций с циклограммами, которые представляются основными, формирующими технологию обработки знаний в наиболее типичных классах задач. В связи с этим в дальнейшем будет акцентироваться внимание на содержательных аспектах описания операций с указанием примеров задач, где эти операции целесообразно использовать.

По мере расширения предметной семантики, которую потребуется описывать формально в терминах динамических отношений, новые операции должны наращиваться из прагматических соображений.

Все операции с циклограммами разделим на пять групп:

1) операции с временными интервалами (теоретико-множественные и алгебраические);
2) теоретико-множественные и алгебраические операции с множествами, на которых определены отношения, циклограммы которых участвуют в операции;
3) теоретико-множественные операции с циклограммами (с индикаторными функциями динамических отношений);
4) алгебраические операции с циклограммами (с индикаторными функциями динамических отношений);
5) семантические операции с циклограммами.

Дадим краткую характеристику перечисленных групп операций.

Первая группа операций предназначена для манипуляций с интервалами, на которых заданы циклограммы. Поскольку эти интервалы являются множествами моментов времени, то для них имеют смысл все теоретико-множественные и алгебраические отношения в обычном (статическом) смысле, а также некоторые дополнительные. Необходимость в таких операциях связана с тем, что в реальных задачах могут присутствовать различные ограничения на временные соотношения между некоторыми событиями, на их длительность. Кроме того, наличие операций первой группы позволяет рассматривать остальные операции только на одинаковых интервалах времени, предполагая, что в противном случае с помощью операций первой группы задачу можно свести к таковой.

Операции второй группы аналогичны обычным операциям с отношениями, где фактор времени не играет роли. Содержательно эти операции отвечают действиям, позволяющим манипулировать составом объектов, для которых рассматриваются динамические отношения, без изменения семантики этих отношений.

Третья группа — это обычные теоретико-множественные операции с отношениями, выполняемые для каждого конкретного момента времени из интервала, на котором заданы участвующие в операции циклограммы. Эти операции сводятся к действиям над индикаторными функциями операндов для одних и тех же элементов множеств задания циклограмм.

Операции четвертой группы не имеют аналогов в теории отношений и предназначены для описания временных соотношений между событиями, явлениями, описываемыми циклограммами. Фактически эти операции решают те же функции, которые возлагаются на псевдофизическую логику времени. Поэтому эффективность реализации операций этой группы существенно определяет в целом эффективность систем обработки динамических знаний на базе алгебры циклограмм.

Суть семантических операций станет ясна после сравнения их с аналогичными по семантике операциями исчисления предикатов первого порядка. Семантические операции позволяют отображать сложные условия на базе более простых, формализуемых в терминах циклограмм.

В следующих подразделах рассматриваются основные операции всех пяти групп.

2.3 Операции с временными интервалами

2.3.1 ***Операция трансформации временного интервала.*** Эта операция унарная, она изменяет интервал времени (расширяет, сужает или трансформирует его в каком-то более широком смысле):

$$(*\,\Delta_1)\mathrm{CKL}\ R(A,\Delta) = \mathrm{CKL}\ R(A,\Delta_1), \tag{2}$$

при этом интервал исходный — Δ и интервал результирующий — Δ_1 могут находиться в любом соотношении. Результатом этой операции является циклограмма того же содержательно отношения R, но для другого интервала времени. Заметим, что вне интервала $\tilde{\Delta} = \Delta \cap \Delta_1$ циклограмма результирующего отношения для всех элементов множества A имеет индикаторные функции, равные нулю.

2.3.2 ***Операция объединения временных интервалов.*** Эта операция унарная:

$$(\bigcup \Delta_1)\mathrm{CKL}\, R(A,\Delta_1) = \mathrm{CKL}\, R(A,\tilde{\Delta}), \tag{3}$$

где $\tilde{\Delta} = \Delta_1 \cup \Delta$.

2.3.3 ***Операция пересечения временных интервалов.***

$$(\cap \Delta_1)\mathrm{CKL}\, R(A,\Delta_1) = \mathrm{CKL}\, R(A, \Delta_1 \cap \Delta). \tag{4}$$

2.3.4 ***Операция вычитания временных интервалов.***

$$(\setminus \Delta_1)\mathrm{CKL}\, R(A,\Delta_1) = \mathrm{CKL}\, R(A, \Delta \setminus \Delta_1), \tag{5}$$

где $\tilde{\Delta} = \Delta \setminus \Delta_1$ — относительное дополнение множеств, отвечающих временным интервалам Δ и Δ_1. Известно, что с помощью перечисленных операций можно выразить любые другие теоретико-множественные преобразования временных интервалов.

Заметим, что в любом случае, когда итоговый интервал $\tilde{\Delta}$ оказывается пустым, циклограмма отношения R также трактуется как пустая.

Особое место занимают алгебраические операции с временными интервалами. Будем их называть общим термином — **операции временной композиции** интервалов. Перечислим эти операции и дадим их содержательную трактовку. Все эти операции — унарные.

2.3.5 ***Левое предшествование временных интервалов***. Эта операция имеет параметр τ :

$$(\tau,\rightarrow\Delta_2\ )\text{CKL}\ R(A,\Delta_1)=\text{CKL}\ R(A,\Delta), \tag{6}$$

где $\Delta_1=\left[t_0^{(1)},t_k^{(1)}\right]$, $\Delta_2=\left[t_0^{(2)},t_k^{(2)}\right]$, $\Delta=[t_0,t_k]$, при этом $t_0=t_0^{(1)}$, (7)

$$t_k=min(t_k^{(1)},t_0^{(2)}-\tau) \text{ и } t_k>t_0,\ (\Delta\neq\varnothing) \tag{8}$$

Результатом операции отношения левого предшествования является циклограмма, интервал которой преобразуется в соответствии с формулами (7), (8). Начало этого интервала совпадает с началом исходного интервала Δ_1, а конец интервала Δ выбирается так, чтобы обеспечить запаздывание интервала Δ_2 относительно Δ_1 не менее, чем на время τ.

Приведем содержательный пример условий в задаче планирования действий (эта задача относится к задаче обработки знаний), для которых интервал выполнимости формально вычисляется как результат применения рассматриваемой операции. Пусть имеются два действия, которые необходимо выполнить с элементами множества A последовательно во времени и при этом второе действие необходимо выполнить в интервале $\Delta_2=\left[t_0^{(2)},t_k^{(2)}\right]$, а между действиями выдержать паузу длительностью τ. Например, A — это множество деталей, с которыми необходимо выполнить две технологические операции в разных цехах. При этом перемещение деталей из цеха в цех занимает время τ, перевозятся они обязательно все вместе, а время начала второй технологической операции, ограничения на выполнение которой заданы некоторой циклограммой на интервале Δ_2, регламентировано и равно $t_0^{(2)}$. Тогда интервал Δ и циклограмма отношения R трансформируются к этому интервалу.

Результирующая циклограмма CKL $R(A,\Delta)$ определяет условия реализации первого действия с учетом описанных ограничений.

2.3.6 ***Правое следование временных интервалов.*** Эта операция по семантике аналогична предыдущей с тем отличием, что с ее помощью вычисляется допустимый интервал выполнения второго (по времени) действия при условии, что время окончания первого действия регулируется:

$$(\tau,\leftarrow\Delta_1\ )\text{CKL}\ R(A,\Delta_2)=\text{CKL}\ R(A,\Delta), \tag{9}$$

где $\Delta=[t_0,t_k]$ и $t_k=max(t_0^{(2)},t_k^{(1)}+\tau)$, (10)

$$t_k=t_k^{(2)},\ t_k>t_0,\ (\Delta\neq\varnothing) \tag{11}$$

Результирующая циклограмма CKL $R(A,\Delta)$ определяет условия реализации второго действия с учетом необходимости паузы длительности τ после момента $t_k^{(1)}$.

2.3.7 ***Левое следование временных интервалов.*** С помощью этой операции вычисляется допустимый интервал выполнения второго действия при ограничении на длительность первого действия:

$$(\tau\ \Delta \leftarrow)\text{CKL}\ R(A,\Delta_2)=\text{CKL}\ R(A,\Delta), \tag{12}$$

где $\Delta = [t_0, t_k]$ и $t_0 = max(t_0^{(1)} + \tau, t_0^{(2)})$, (13)

$$t_k = t_k^{(2)},\ t_k > t_0,\ (\Delta \neq \varnothing) \tag{14}$$

Отношение R отвечает условиям выполнения второго действия (оно может выполняться не ранее чем через τ после начала первого), а интервал Δ задает интервал, на котором его можно выполнять.

2.3.8 ***Правое предшествование временных интервалов.*** Эта операция по семантике аналогична предыдущей и формирует временной интервал, на котором может выполняться первое действие (ему отвечает отношение R) с учетом ограничений на длительность второго:

$$(\tau, \Delta_2 \rightarrow)\text{CKL}\ R(A,\Delta_1)=\text{CKL}\ R(A,\Delta), \tag{15}$$

где $\Delta_1 = [t_0^{(1)}, t_k^{(1)}]$, $\Delta_2 = [t_0^{(2)}, t_k^{(2)}]$, $\Delta = [t_0, t_k]$, при этом $t_0 = t_0^{(1)}$, (16)

$$t_k = min(t_k^{(1)}, t_k^{(2)} - \tau)\ \text{и}\ t_k > t_0,\ (\Delta \neq \varnothing) \tag{17}$$

Практический смысл этой группы операций в том, что они позволяют выразить различного рода временные соотношения на выполнение некоторой последовательности действий, привязанных к временной шкале.

2.4 Операции с множествами задания динамических отношений

В практических задачах часто возникает необходимость трансформировать множество задания динамического отношения. Например, может возникнуть необходимость выделить в множестве A некоторое подмножество объектов, удовлетворяющих какому-либо набору условий. В общем случае такие действия могут быть выражены с помощью теоретико-множественных или алгебраических операций с носителем динамического отношения. Дадим характеристику этой группы операций.

2.4.1 ***Сужение отношения на подмножество.*** Пусть задана некоторая циклограмма CKL $R(A,\Delta)$ и множество A_1. Сужением отношения R на подмножество $A_2 = A_1 \cap A$ будем называть динамическое отношение с циклограммой CKL $R(A_2,\Delta)$.

2.4.2 ***Расширение отношения.*** В тех же условиях расширением отношения R будем называть динамическое отношение с циклограммой CKL $R(A_2,\Delta)$, где $A_2 = A_1 \cup A$. Заметим, что на элементах множества $A_1 \setminus A$ индикаторная функция нового отношения равна нулю, однако эта операция имеет смысл как вспомогательная, например, в случаях, когда необходимо использование других операций, в которых должна участвовать циклограмма CKL $R(A,\Delta)$, предполагающих равенство носителей отношений-операндов.

2.4.3 ***Относительное дополнение отношения.*** В условиях, аналогичных условиям двух предыдущих операций, относительным дополнением отношения R будем называть динамическое отношение, заданное циклограммой CKL $R(A_2,\Delta)$, где $A_2 = A_1 \setminus A$.

Содержательно могут быть сформулированы и другие варианты теоретико-множественных манипуляций с множествами-носителями отношений, однако их не имеет смысла рассматривать в качестве самостоятельных, поскольку они могут быть выражены через уже введенные.

Рассмотрим некоторые содержательно осмысленные алгебраические операции с динамическими отношениями, в основе которых лежат различного рода преобразования множеств задания.

2.4.4 ***Проектирование отношения***. Эта операция имеет смысл в том случае, когда носитель A отношения R является декартовым произведением других множеств, т. е. $A = A_1 \times A_2 \times \ldots \times A_n$, а отношение R является n-арным при $n \geq 2$. Пусть $I = (t_1,t_2,...,t_k)$ — подмножество индексов множества $(1,2,....,n)$, $(t_1 < t_2 < ... < t_k)$.

Проекцией отношения R на множество $A^* = (A_{t_1} \times A_{t_2} \times \ldots \times A_{t_k})$ будем называть динамическое отношение R с носителем A^*, для которого циклограмма формируется следующим образом. Пусть a^* — некоторый элемент множества A^* и $a_{j_1}, a_{j_2}, ..., a_{j_r}$ — множество его прообразов в множестве A при проектировании на A, и для каждого из этих прообразов индикаторная функция в циклограмме CKL $R(A,\Delta)$ не равна тождественно нулю. Тогда индикаторная функция результирующего (нового) динамического отношения — проекции отношения R на множество A^* для каждого момента времени $t \in \Delta$ равна единице, если для этого же момента времени индикаторная функция хотя бы для одного из элементов $a_{j_1}, a_{j_2}, ..., a_{j_r}$ в исходной циклограмме равна единице.

В противном случае индикаторная функция элемента a^* в момент времени t полагается равной нулю.

2.4.5 ***Агрегирование отношения.*** Пусть $A_1, A_2, \ldots, A_n$ — разбиение множества A по некоторому отношению эквивалентности F и $A|_{\approx F}$ — фактор-множество этого отношения эквивалентности, $A|_{\approx F} = \{f_1, f_2, ..., f_n,\}$. Тогда результатом агрегирования динамического отношения R с циклограммой CKL $R(A,\Delta)$ будет новое динамическое отношение R_1 с циклограммой CKL $R_1(A|_{\approx F},\Delta)$, при этом индикаторная функция для каждого из элементов $a_i \in A|_{\approx F}$ строится аналогично способу, описанному в предыдущей операции для элемента a^* с тем отличием, что элементы $a_{j_1}, a_{j_2}, ..., a_{j_r}$ — это элементы, эквивалентные по отношению F в множестве A, и f_i — элемент фактор-множества $A|_{\approx F}$, сопоставляемый классу $A_i = \{ a_{j_1}, a_{j_2}, ..., a_{j_r} \}$.

В некоторых задачах может потребоваться использование операции, в определенном смысле обратной к агрегированию, когда $a_i \in A$ рассматривается как элемент фактор-множества по некоторому отношению эквивалентности, которому в прообразе этого фактор-множества ставится в соответствие подмножество $\widetilde{A}_i = \{ \widetilde{a}_{j_1}, \widetilde{a}_{j_2}, ..., \widetilde{a}_{j_r} \}$. Эту операцию будем называть операцией **декомпозиции отношения** R, а ее результат — новое отношение, в котором каждому элементу $\widetilde{a}_{j_k} \in \widetilde{A}_i$, $j_k \in \{ j_1, j_2, ..., j_r \}$ ставится в соответствие индикаторная функция, совпадающая с индикаторной функцией элемента a_i в исходной циклограмме CKL $R(A,\Delta)$.

Заметим, что все эти операции, за исключением трех последних, не изменяют индикаторные функции исходного динамического отношения, а преобразуют только множество, на котором задано отношение. В отличие от этого последние три операции трансформируются как множество задания, так и множество индикаторных функций.

2.5 Теоретико-множественные и алгебраические операции с циклограммами

Вводимые в данном пункте операции обязательно предполагают манипуляции с индикаторными функциями, поэтому они, в отличие от ранее перечисленных операций, названы операциями с циклограммами. Последнее существенно, ибо в результате операций с циклограммами формируется новое по смыслу динамическое отношение.

Рассмотрим сначала бинарные теоретико-множественные операции с циклограммами. Будем предполагать, что циклограммы-операнды определены на одном и том же множестве и заданы на общем интервале времени. Это всегда может быть достигнуто комплексированием вводимых здесь операций с ранее рассмотренными.

2.5.1 ***Объединение циклограмм*** CKL $R_1(A,\Delta) \cup$ CKL $R_2(A,\Delta)$ есть операция, результатом которой будет новая циклограмма, в которой для каждого элемента из множества A индикаторная функция формируется как объединение индикаторных функций первой и второй циклограмм. Иначе говоря, для любого $a \in A$ и $t \in \Delta$ значение индикаторной функции в результирующей циклограмме равно 1 тогда и только тогда, когда хотя бы в одной из циклограмм CKL $R_1(A,\Delta)$ или CKL $R_2(A,\Delta)$ для этого элемента a и момента времени t индикаторная функция равна 1. В противном случае значение индикаторной функции для пары $< a,t >$ равно 0.

2.5.2 ***Пересечение циклограмм*** $\mathrm{CKL}\,R_1(A,\Delta)\cap\mathrm{CKL}\,R_2(A,\Delta)$. В ней для каждого элемента $a\in A$ и для каждого момента времени $t\in\Delta$ индикаторная функция равна 1 тогда и только тогда, когда в обеих циклограммах индикаторные функции элемента a для момента t равны 1. В противном случае значение индикаторной функции равно 0.
2.5.3 ***Разность циклограмм*** $\mathrm{CKL}\,R_1(A,\Delta)\backslash\mathrm{CKL}\,R_2(A,\Delta)$ есть операция, результатом которой будет новая циклограмма, в которой для любого элемента $a\in A$ и любого момента времени $t\in\Delta$ значение индикаторной функции равно 1 тогда и только тогда, когда для этой же пары $<a,t>$ индикаторная функция в первой циклограмме равна 1, а во второй — нулю. В противном случае индикаторная функция результирующей циклограммы для этой же пары равна нулю.

Набор теоретико-множественных операций с циклограммами будет полным, если к ранее названным добавить еще одну, называемую далее **инверсией циклограммы**.
2.5.4 ***Инверсия циклограммы*** $\mathrm{CKL}\,R_1(A,\Delta)$ есть унарная операция, которая каждому элементу $a\in A$ и моменту времени $t\in\Delta$ ставит в соответствие значение индикаторной функции, равное 1, в том и только том случае, когда в исходной циклограмме значение индикаторной функции для пары $<a,t>$ равно 0.

Рассмотрим теперь алгебраические операции с циклограммами.
2.5.5 ***Транспонирование циклограммы*** $\mathrm{CKL}\,R_1(A,\Delta)$ есть унарная операция, которая формирует циклограмму нового динамического отношения, в котором порядок следования элементов в n-ках множества $A=A_1\times A_2\times\ldots\times A_n$ заменен на обратный по сравнению с порядком их следования в исходной циклограмме с сохранением для каждой такой n-ки индикаторной функции исходной циклограммы.
2.5.6 ***Пороговое усечение циклограммы*** $\mathrm{CKL}\,R\,(A,\Delta)$ с параметром τ есть унарная операция, результатом которой является новая циклограмма, отличающаяся от исходной тем, что в ней удалены все те «импульсы» индикаторной функции каждого из элементов множества A, которые по длительности не превышают заданного порога τ.

Прагматика данной операции очевидна. Пусть циклограмма описывает, например, доступность некоторого ресурса на интервале времени Δ для каждого из элементов множества A, а величина τ характеризует минимальную потребность в нем в единицах времени.

Результатом применения операции порогового усечения циклограммы будет новая циклограмма, содержащая только допустимые по потребному ресурсу интервалы доступности, т. е. те и только те из них, которые имеет смысл принимать во внимание при решении соответствующей задачи планирования использования ресурса элементами множества A. Подобные задачи имеют достаточно широкое распространение.

Обратимся к описанию бинарных алгебраических операций. Прежде всего укажем, что к ним относится операция **композиции динамических отношений** в обычном смысле, если ее рассматривать применительно к каждому моменту времени из интервала A. Однако в отличие от такой операции в случае обычных (статических) отношений ее результат будем записывать как тернарное отношение, поскольку для каждого момента времени существенно, через какой «промежуточный» элемент возможно транзитивное замыкание. Заметим, что эта операция имеет смысл лишь в том случае, когда операнды отвечают бинарным отношениям. Итак, композицией двух циклограмм CKL $R_1\ (A\times B,\Delta)$ и CKL $R_2(B\times C,\Delta)$будем называть циклограмму CKL $R_1\ (A\times B\times C,\Delta)$, полученную из исходных путем обычной операции композиции, выполненной для каждого момента времени из интервала Δ.

На практике обычно приходится иметь дело с более сложными ситуациями, в которых временные соотношения характеризуются предшествованием или следованием с указанием интервала времени, задающего численную характеристику этого предшествования или следования. Для выражения таких временных отношений необходимо ввести операции, аналогичные рассмотренной операции композиции циклограмм, но для моментов времени, сдвинутых друг относительно друга на некоторый интервал времени длительности τ. Это позволит выразить формально семантику отношения следования или предшествования событий, действий и т. п. Заметим, что введенных ранее аналогичных по смыслу операций с временными интервалами недостаточно для выражения семантики следования или предшествования в полном объеме. Рассмотрим соответствующие операции с циклограммами.

2.5.7 ***Композиция циклограмм с левым следованием***. Эта операция бинарная и имеет смысл для циклограмм бинарных динамических отношений. Пусть даны две циклограммы CKL $R_1\ (A\times B,\Delta)$ и CKL $R_2(B\times C,\Delta)$ и параметр сдвига τ_0. Рассмотрим две пары $<a,b>\in A\times B$ и $<b,c>\in B\times C$. В итоговой циклограмме рассматриваемая операция этим парам ставит в соответствие тройку $<a,b,c>$, для которой формируется набор индикаторных функций по следующей схеме.

1. Вводится нумерация «импульсов» индикаторной функции пары $<a,b>\in A\times B$ в циклограмме CKL $R_1\ (A\times B,\Delta)$. Обозначим это множество символом I_b^1, $I_b^1=\{1,2,...,k\}$. В множество I_b^1 включаются те и только те импульсы, длительность которых превышает τ .

2. Для всех $i\in I_b^1$ в порядке возрастания номеров выполняется такая последовательность действий:

а) отыскивается τ_H^i — время, отвечающее переднему фронту i-го им-

пульса индикаторной функции элемента $<a,b>$;
b) в i-ю индикаторную функцию элемента $<a,b,c>$ итоговой циклограммы включаются интервалы выполнимости динамического отношения R_2 для пары $<b,c>$, начинающиеся «позже» момента $\tau_H^i + \tau$. Обозначим эту индикаторную функцию символом $<a,b,c>_i$.

3. Результат рассматриваемой операции — это множество индикаторных функций $\{<a,b,c>\}_i$, где $i \in I_b^1$ для каждой тройки $<a,b,c>$, которые и формируют итоговую циклограмму.

2.5.8 ***Композиция циклограмм с правым следованием***. Эта операция аналогична предыдущей с тем отличием, что в п. **2**a) схемы вместо величины τ_H^i формируется величина τ_k^i — время окончания i-го импульса, а в п. **2**b) вместо величины «задержки» $\tau_H^i - \tau$ (при условии, что $\tau_H^i - \tau \le \tau_H^i$).

Содержательный смысл двух последних операций в том, что они позволяют сформировать для пары действия, условия выполнимости которых заданы отношениями R_1 и R_2, те интервалы времени, в которые возможно их последовательное во времени выполнение при условии, что первое действие (ему отвечает отношение R_1) выполняется в «импульсе» с номером i, а длительность действия задана параметром τ. Различие в семантике операций композиции с правым и левым следованием легко устанавливается.

2.5.9 ***Композиция циклограмм с левым предшествованием.*** В этой операции присутствует параметр τ^*, который имеет смысл времени выполнения второго действия (в терминах, использованных при пояснении двух предыдущих операций). Смысл этой операции аналогичен рассмотренным, только в ней формируются условия на выполнение первого действия, если второе будет выполняться во время соответствующего «импульса». Более точно, пусть даны две циклограммы CKL $R_1(A \times B, \Delta)$ и CKL $R_2(B \times C, \Delta)$. Для двух элементов $<a,b> \in A \times B$ и $<b,c> \in B \times C$ рассматриваемая операция формирует набор индикаторных функций $\{<a,b,c>_i\}$, $i \in I_b^2$, где I_b^2 — множество номеров «импульсов», длительности не меньше τ индикаторной функции пары $<b,c>$ в циклограмме отношения R_2 по следующей схеме для каждого i:

1. Отыскивается время τ_H^i, отвечающее переднему фронту i-го «импульса» индикаторной функции элемента $<b,c>$ в циклограмме CKL $R_2(B \times C, \Delta)$;

2. В i-ю индикаторную функцию элемента $<a,b,c>$ итоговой циклограммы включаются интервалы выполнимости динамического отношения R_1 для пары $<a,b>$, заканчивающиеся не позже момента τ_H^i.

2.5.10 ***Композиция циклограмм с правым предшествованием.***
Операция аналогична предыдущей с заменой τ_H^i на $\tau_k^i - \tau$, где τ_k^i — время, отвечающее заднему фронту i-го «импульса» индикаторной функции элемента $< b,c >$ в циклограмме CKL $R_2(B \times C, \Delta)$.

2.6 Семантические операции с циклограммами

Рассмотрим пару динамических **отношений** R_1 и R_2 с циклограммами CKL $R_1(A,\Delta)$ и CKL $R_2(B,\Delta)$**.** Множества A и B могут находиться в произвольных соотношениях: быть различными, пересекаться, совпадать. Семантическими назовем такие бинарные операции теоретико-множественного характера, которые на основе исходной пары циклограмм формируют новую циклограмму, заданную на декартовом произведении $A \times B$ и том же самом интервале Δ. Потребность в таких операциях определяется практикой. Они представляют собой, по сути, модельные аналоги операций с предикатами, задававшихся в терминах логических связок типа дизъюнкции, конъюнкции, импликации и др.

Правила преобразования циклограмм с помощью семантических операций будут достаточно ясны, если приводить аналогии с уже рассмотренными ранее бинарными теоретико-множественными операциями с циклограммами. Перечислим некоторые из семантических операций.
2.6.1 ***Семантическое объединение циклограмм.*** Индикаторная функция для каждой пары $< a,b >, a \in A, b \in B$ отношения $R_1 \cup R_2$ равна 1 для объединения временных интервалов, на которых равна 1 хотя бы одна из индикаторных функций: элемента a в циклограмме отношения R_1 или элемента b в циклограмме отношения R_2.
2.6.2 ***Семантическое пересечение циклограмм.*** Результат этой операции — новое отношение, в котором индикаторная функция для любой пары $< a,b >$, $a \in A, b \in B$ имеет значение 1 для момента $t \in \Delta$ тогда и только тогда, когда обе индикаторные функции: элемента a в отношении R_1 и элемента b в отношении R_2 одновременно равны 1 для одного и того же момента времени t.
2.6.3 ***Семантическое вычитание циклограмм.*** Результат этой операции — семантическая разность циклограмм, есть новое отношение, в котором индикаторная функция для пары $< a,b >$ равна 1 тогда и только тогда, когда для a в отношении R_1 она равна 1, а для b в отношении R_2 равна нулю.

Очевидно, что список таких операций можно было бы продолжить, строя теоретико-множественные аналогии операций алгебры логики.

Эти операции названы семантическими потому, что потребность в них возникает из содержательных особенностей прикладных задач, а теоретико-множественный их характер касается только индикаторных функций операндов, но не тех множеств, на которых определены отношения.

3 Примеры прикладных задач обработки динамических знаний

Существует достаточно широкий класс практически важных задач, в которых необходимо планировать выполнение некоторого набора действий в условиях временных ограничений на возможности использования различных ресурсов. Рассмотрим содержательно некоторые примеры задач подобного рода, затем дадим их формализацию и покажем, каким образом можно для их эффективного решения воспользоваться математическим аппаратом и алгоритмическими средствами алгебры циклограмм.

Пусть имеется некоторая транспортная сеть, по которой нужно выполнить перевозку заданного множества различных грузов. Все множество узлов транспортной сети разделим на три подмножества:

$A = \{a_i\}, i = 1,2,...,n$ — множество пунктов формирования (отправления) грузов;

$B = \{b_j\}, j = 1,2,...,l$ — множество пунктов, в которых возможна перегрузка (множество промежуточных пунктов транспортной сети);

$C = \{c_k\}, k = 1,2,...,m$ — множество потенциальных адресатов пунктов, в которые грузы могут быть доставлены.

Пусть $X = \{x_r, r = 1,....,p\}$ — множество грузов, про каждый из которых известны: пункт отправления a_i, время его готовности к перевозке в этом пункте. Эту информацию отобразим приписыванием x_r и t_r (t_r — время готовности груза x_r к отправке) дополнительного индекса: $x_r^{(i)}$, $t_r^{(i)}$.

Кроме того, полагаем, что для каждого груза указано ограничение по времени его доставки $t_{r\,max}$ ($t_{r\,max}$ — момент времени, не позже которого груз должен быть доставлен адресату).

Потенциальным адресатом груза x_r может быть любой из пунктов множества $c_k \in C$, при этом он может быть доставлен либо прямо в пункт назначения, либо через один из пунктов перегрузки, заданных подмножеством $b_r \in B$ (например, самолетом, либо по железной дороге, но с перегрузкой на речной транспорт).

Пусть в рассматриваемой задаче имеется специфический набор ограничений следующего характера. Перевозка груза x_r в каждый из потенциальных пунктов перегрузки, из него в конечный пункт, а также напрямую из пункта отправления в пункт назначения возможны не всегда, а только в пределах фиксированных «временных окон», выделяемых, например, владельцем транспортной сети для всего множества грузов X. Происхождение таких ограничений может иметь различный характер. Например, их наличие может быть обусловлено тем фактом, что процесс перевозки осуществляется при наличии уже имеющейся загрузки транспортной сети, например, при наличии загрузки за счет пассажирских или еще каких-либо уже запланированных перевозок.

Целью управления перевозками является максимизация некоторого показателя качества. Например, таким показателем может быть суммарный объем перевезенных грузов с учетом их приоритетности и в условиях выполнения заданного множества ограничений. Аналогичные по смыслу цели преследуются и в задачах, рассматриваемых далее в качестве примеров.

В качестве **другого** примера подобной же задачи можно привести задачу оперативного планирования технологических процессов с использованием частично загруженного оборудования. К аналогичной постановке сводится вообще широкий класс задач теории расписаний, диспетчерского управления в контексте имеющегося плана использования ограниченных ресурсов.

Третий пример — это уже упоминавшаяся во введении задача планирования поведения робота в динамически изменяющейся среде, которая по каким-либо причинам формирует те или иные препятствия, запреты на выполнение некоторых действий в зависимости от времени. Заметим, что происхождение запретов может быть обусловлено возникновением чисто механических препятствий на перемещение робота, периодически возникающими вредными воздействиями внешней среды (например, излучениями, исключающими функционирование некоторых компонент системы управления роботом), процессами загрузки и освобождения ресурсов, с использованием которых связано выполнение запланированных действий, и другими причинами.

Еще один пример задачи с динамическими ограничениями — оперативное управление распределением ресурсов вычислительной сети на фоне уже имеющейся их загрузки, на фоне выполнения ремонтных или регламентных работ.

Подчеркнем, что в данном пункте не ставится цель детального и полного рассмотрения задач, сформулированных содержательно в приведенных примерах. Здесь внимание концентрируется лишь на алгоритмизации тех аспектов, которые имеют отношение к теме работы, а именно, к использованию формализма циклограмм в этих задачах и оценке возможностей этого формализма. Заметим, что подобные задачи могут решаться с применением технологий искусственного интеллекта (именно так их надо решать), и в этом контексте данный класс задач относится также к задачам обработки динамических знаний.

Обратимся к первой задаче из сформулированных выше. Отношения, задающие статические и динамические ограничения на перевозки в транспортной сети, формально зададим следующими циклограммами:

1. CKL $R_1(X \times A, \Delta)$ — «на пункте имеется груз $x_r \in X$ в момент $t \in \Delta$».

Индикаторная функция равна 1, начиная с момента t_r и до правого конца интервала Δ.

2. CKL $R_2(X \times A, \Delta)$ — «груз $x_r \in X$, находящийся в пункте $a_i \in A$, должен быть доставлен адресату не позднее заданного момента времени

$t_{r\,max}$». В этом отношении индикаторная функция для каждого $x_r \in X$ равна 1 от левого конца интервала $\Delta = [t_0, t_k]$ до $t_{r\,max}$, если $t_{r\,max} < t_k$, и до t_k — в противном случае. Очевидно, каким образом формализовать ограничение и на самый ранний момент прибытия груза $t_{r\,min}$: в этом случае индикаторная R_2 для $x_r \in X$ должна быть отличной от 0 в интервале $[t_{r\,min}, t_{r\,max}]$.

3. CKL $R_3(A \times B, \Delta)$ — «груз из пункта $a_i \in A$ может перевозиться в пункт перегрузки $b_j \in B$». Здесь индикаторная функция для каждой пары $< a_i, b_j >$ равна 1 на тех подынтервалах из интервала Δ, на которых эта перевозка разрешена.

4. CKL $R_4(B \times C, \Delta)$ — «груз из пункта перегрузки $b_j \in B$ может перевозиться в пункт $c_k \in C$». Индикаторная функция для каждой пары $< b_j, c_k >$ на интервале Δ равна 1 тогда и только тогда, когда такая перевозка разрешена.

5. CKL $R_5(A \times C, \Delta)$ — «груз из пункта $a_i \in A$ может быть перевезен в пункт $c_k \in C$ напрямую, т. е. без перегрузки в некотором b_j». Смысл отношения аналогичен смыслу двух предыдущих отношений.

6. CKL $R_6(X \times C, \Delta)$ — «груз $x_r \in X$ имеет потенциальным адресатом пункт $c_k \in C$». Это отношение может быть постоянным в пределах конкретной задачи или изменяться в зависимости от времени, если, например, потребность в x_r в пункте c_k со временем может отпасть или, наоборот, появиться.

Эти отношения формализуют основные ограничения на перевозки в транспортной сети. Дополнительно следует задать матрицы $T_1(a_i, b_j)$, $T_2(b_j, c_k)$ и $T_3(a_i, c_k)$, определяющие длительность перевозок между пунктами, указанными в скобках в качестве аргументов. Будем далее для простоты полагать, что матрицы $T_1(a_i, b_j)$, $T_2(b_j, c_k)$ и $T_3(a_i, c_k)$ имеют на всех позициях и для всех моментов времени интервала Δ значения τ_1, τ_2 и τ_3 соответственно.

Технология решения распределительной задачи, ограничения в которой формализованы циклограммами CKL $R_1(X \times A, \Delta)$ – CKL $R_6(X \times C, \Delta)$ и матрицами $T_1(a_i, b_j)$, $T_2(b_j, c_k)$ и $T_3(a_i, c_k)$ может быть различной при различных характеристиках задачи и других ее особенностях. Алгебра циклограмм предоставляет возможности для компактного формального описания самых разнообразных технологий и прежде всего тех, которые ориентированы на активное использование диалогового режима и привлечения методов и средств когнитивной графики. Поскольку здесь не ставится цель детальной проработки технологии решения задачи, этот вопрос подробно рассматриваться не будет. Наметим только некоторые компоненты такой технологии, акцентируя внимание лишь на возможностях, которые появляются в связи с использованием алгебры циклограмм. Дадим описание своего рода «заготовок» для конструирования технологии решения динамических распределительных задач.

3.2.1 Циклограмма CKL $R_7(X \times A, \Delta)$=CKL $R_1(X \times A, \Delta) \cap$ CKL $R_2(X \times A, \Delta)$ обладает семантикой «груз $x_r \in X$, находящийся в пункте $a_i \in A$, должен транспортироваться на интервалах времени, на которых динамическое отношение R_7 имеет для пары $< x_r, a_i >$ индикаторную функцию, равную 1», где $\cap$ — теоретико-множественное пересечение циклограмм. Иначе говоря, циклограмма отношения R_7 задает допустимые интервалы транспортировки грузов и для каждого из грузов указывает пункт, на котором он находится.

3.2.2 Циклограмма CKL $R_8(X \times A \times B, \Delta)$=CKL $R_7(X \times A, \Delta) \circ$ CKL $R_3(A \times B, \Delta)$ имеет смысл «груз $x_r \in X$ с пункта $a_i \in A$ может перевозиться в пункт перегрузки $b_j \in B$ в интервалах времени, для которых индикаторная функция элемента $< x_r, a_i, b_j >$ в отношении R_8 равна 1», где $\circ$ — операция композиции циклограмм. Заметим, что в случае, когда перевозка груза связана с необходимостью регламентированной задержки, его после поступления на пункт a_i на время τ, для вычисления допустимых интервалов перевозки грузов $x_r \in X$ из пунктов $a_i \in A$ в пункты $b_j \in B$ пришлось бы воспользоваться операцией композиции циклограмм с левым следованием.

3.2.3 Циклограмма CKL $R_9(X \times A \times B, \Delta)$= $(>^{\tau})$CKL $R_8(X \times A \times B, \Delta)$, где $(>^{\tau})$ — операция порогового усечения циклограммы динамического отношения R_8, τ — длительность перевозок грузов из пунктов $a_i \in A$ в пункты $b_j \in B$ задает те же интервалы, что и циклограмма отношения R_8 с учетом допустимости по требуемому времени перевозки.

3.2.4 Циклограмма

$$\text{CKL } R_{10}(X \times A \times C, \Delta) = [\text{CKL } R_7(X \times A, \Delta)]^{\mathrm{T}} \circ \text{CKL } R_6(X \times C, \Delta)$$

задает допустимые интервалы времени для перевозки грузов из пунктов $a_i \in A$ непосредственно в пункты $c_k \in C$ с учетом

– времени появления груза в пункте $a_i \in A$;

– требований по времени доставки грузов $x_r \in X$ адресатам;

– только для множества потенциальных адресатов для каждого из грузов и при этом $[\ ]^{\mathrm{T}}$ — операция транспонирования циклограммы в квадратных скобках, а $\circ$ — операция композиции циклограмм.

Иначе говоря, если в отношении R_{10} тройка $< x_r, a_i, c_k >$ не имеет тождественно равную нулю индикаторную функцию, то это означает, что груз x_r, сформирован на пункте a_i, содержит в качестве потенциального адресата c_k, а доставка его из пункта a_i в пункт c_k, если она будет выполняться, должна осуществляться на интервалах времени, для которых индикаторная функция отношения R_{10} для этой тройки равна 1.

3.2.5 Циклограмма отношения R_{10} не учитывает наличие ограничений по ресурсам, которые определяют допустимые интервалы времени перевозок из пунктов $a_i \in A$ в пункты $c_k \in C$. Учет этих ограничений требует привлечения информации, содержащейся в циклограмме CKL $R_5(A \times C, \Delta)$, что приводит к такой циклограмме:

CKL $R_{11}(X \times A \times C, \Delta) =$ CKL $R_{10}(X \times A \times C, \Delta) \circ$ CKL $R_5(A \times C, \Delta)$.

Смысл отношения R_{11} аналогичен смыслу отношения R_8, но для прямых перевозок из пунктов $a_i \in A$ в пункты $c_k \in C$.

Аналогично тому, как это было представлено для перевозок из пунктов $a_i \in A$ в пункты $b_j \in B$ (см. циклограмму CKL $R_9(X \times A \times B, \Delta)$, могут быть формально учтены ограничения на длительность перевозок между пунктами $a_i \in A$ и $c_k \in C$, для чего необходимо воспользоваться операцией порогового усечения циклограммы. При наличии регламентированных задержек грузов в пунктах a_i длительности τ допустимые интервалы транспортировки грузов в пункты $c_k \in C$ формируются применением вместо операции композиции циклограмм, как это имело место при формировании циклограммы отношения R_{11}, операции композиции с левым следованием.

3.2.6 Циклограмма

CKL $R_{12}(X \times A \times C, \Delta)$=CKL $R_9(X \times A \times B, \Delta)$ $(\tau \cdot \rightarrow)$ CKL $R_4(B \times C, \Delta)$,

где $(\tau \cdot \rightarrow)$ — символ операции композиции с левым следованием, определяет интервалы времени, на которых возможна перевозка грузов $x_r \in X$ из $a_i \in A$ в пункты $c_k \in C$ при использовании перегрузок в пунктах $b_j \in B$ и при выполнении полного комплекса ограничений, которые учтены в отношении R_9, а также

– конечной длительности перевозок на первом этапе — из пунктов $a_i \in A$ в пункты $b_j \in B$;

– выделенных ресурсов на перевозку грузов из пунктов $b_j \in B$ в пункты $c_k \in C$;

– последовательности во времени двух событий: «груз $x_r \in X$ перевозится из пункта $a_i \in A$ в пункт $b_j \in B$» и «груз $x_r \in X$ перевозится из пункта $b_j \in B$ в пункт $c_k \in C$».

Циклограмма отношения R_{12} содержит исходную информацию для планирования перевозок с перегрузками, а циклограмма отношения R_{11} — для планирования прямых перевозок.

Далее можно поступать различным образом. Один из вариантов — это диалоговая оптимизация транспортных перевозок на базе циклограмм

R_{11}, R_{12}, интегрирующих в себе «почти» все ограничения, формирующие «окна» для допустимых перевозок и учитывающие временную последовательность событий.

Таким образом, с помощью перечисленного набора действий с циклограммами можно в явном виде сформировать множество допустимых перевозок в зависимости от времени. В результате исходная задача для динамической транспортной сети существенно упрощается. В ней остаются фактически только комбинаторные ограничения типа:

– «каждый груз перевозится только по одному маршруту»;
– «на каждом маршруте одновременно может перевозиться только один груз».

В результате исходная практически «необозримая» задача динамического распределения приобретает структуру одной из традиционных постановок.

Конечно, эта задача пока еще достаточно объемна, но аппарат алгебры циклограмм предоставляет дополнительные возможности для ее упрощения. Например, с помощью операций типа относительного дополнения или вычитания циклограмм, инверсии и пересечения можно сразу выделить множество допустимых неконфликтующих вариантов перевозок, сформировать «частичное решение» и упростить задачу в очередной раз. Имеются и другие возможности, в частности использующие эвристики, сформированные по информации, даваемой исходными циклограммами и производными от них. Однако это уже предмет особого исследования, причем уже в рамках конкретной задачи.

Заключение

Предложен новый объект исследований — динамические отношения, проявляющиеся при использовании информационных технологий в изменяющихся условиях, и модель его исследования — алгебра циклограмм, ее функциональное наполнение (набор операций), которые определяют научную новизну исследования.

Литература

1. Collins C., Dennehy D., Conboy K., Mikalef P. Artificial Intelligence in Information Systems Research: A Systematic Literature Review and Research Agenda // International Journal of Information Management, 2021. Т. 60, № 4. P. 102383.

2. Borges A. F. S., Laurindo F. J. B., Spínola M. M. et al. The Strategic Use of Artificial Intelligence in the Digital Era: Systematic Literature Review and Future Research Directions // International Journal of Information Management, 2021. Т. 57, № 17. P. 102225.

3. Agrawal A., Gans J., Goldfarb J. The Economics of Artificial Intelligence. University of Chicago Press, 2019. 648 p.

4. Alferes J. J., Pereira L. M., Przymusinska H. et al. Dynamic Knowledge Representation and Its Applications in Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications. Eds. G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen et al. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. Pp. 1–10.

5. Hotaling J. M., Fakhari P., Busemeyer J. Dynamic Decision Making // International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier, 2015. Pp. 708–713.

6. Gonzalez C., Fakhari P., Busemeyer J. Dynamic Decision Making: Learning Processes and New Research Directions // Human factors, 2017. Vol. 59, № 5. Pp. 713–721.

7. Fox J., Cooper R. P., Glasspool D. W. A Canonical Theory of Dynamic Decision-making // Frontiers in Psychology, 2013. Vol. 4. P. 150.

8. Rönkkö M. Hybrid systems: Modelling and Analysis Using Emergent Dynamics // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2007. T. 1, № 4. Pp. 560–576.

9. Pathak A. K., Bahuguna H. IoT and Smart Cities in Internet of Things and Businesses in a Disruptive Economy. Eds. R. Sharma, R. Saini, C. Prakash, V. Prasad. New York: Nova Science Publishers, 2020. 372 p.

10. Liability for Artificial Intelligence and the Internet of Things. Eds. S. Lohsse, R. Schulze, D. Staudenmayer. Baden-Baden Germany, Oxford: Nomos; Hart Publishing, 2019. 235 p.

11. Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises Part 1. Digital Platform and Digital Ecosystem // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2019. T. 20, № 6. Pp. 323–332.

12. Manfredi S. Multilayer Control of Betworked Cyber-Physical Systems. Switzerland: Springer, 2017. 137 p.

13. Lee E. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems // Sensors, 2015. T. 15. Pp. 4837–4869.

14. Furman I., Allashev A., Piskarev A., Bovchaliuk S. Development and Study of Technological Visual Programming of Logic Control Problems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. T. 6, № 2 (90). Pp. 23–31.

15. Ghorbel F., Hamdi F., Métais E. et al. Ontology-based Representation and Reasoning About Precise and Imprecise Temporal Data: A Fuzzy-Based View // Data & Knowledge Engineering, 2019. T. 124, № 2. P. 101719.

16. Grüninger M., Li. Z. The Time Ontology of Allen's Interval Algebra in 24th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME 2017). Dagstuhl, 2017. P. 16.

17. Kovalev I. V., Testoyedov N. A., Koltashev A. A., Efa S. G. Aerospace Engineering Experience and On-Board Software Projects of Satellite Navigation Systems // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021. T. 1047, № 1. P. 12067.

18. Rashid A., Sawyer P. Dynamic Relationships in Object Oriented Databases: A Uniform Approach in Database and Expert Systems Applications. Eds. G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, T. J. M. Bench-Capon et al. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. Pp. 26–35.

Статья поступила в редакцию 15.09.2021; одобрена после рецензирования 15.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

DYNAMIC RELATIONSHIPS IN KNOWLEDGE PROCESSING TASKS

Alexander S. Geida
Ph.D., Senior Researcher
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39 14th Line of V.O., St. Petersburg 199178, Russia
geida@iias.spb.su

Ludmila N. Fedorchenko
Ph.D., Senior Researcher
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39 14th Line of V.O., St. Petersburg 199178, Russia
lnf@iias.spb.su

Irina V. Afanasieva
Ph.D., Head of Advanced Design Laboratory
Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS)
Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkesia 369167, Russia
riv@sao.ru

Dmitry S. Khasanov
postgraduate student
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39 14th Line of V.O., St. Petersburg 199178, Russia
dkhasanovsuai@yandex.ru

Abstract. The article proposes a new object of research in the tasks of processing dynamic knowledge — dynamic relations manifested when using information technologies in modern changing conditions, and also presents a model that allows one to study this object — the algebra of cyclograms. Operations with time intervals, set-theoretical and algebraic operations on dynamic relations, semantic operations with cyclograms are listed, a brief description of the operations is given and their analysis is carried out from the point of view of their use in knowledge processing tasks. Dynamic relations are relevant in applied problems in which there are different types of resources, different policies for their use, resource failures, there are flows of applications for the use of heterogeneous shared resources; an assembly of a complex product is planned or a schedule is being drawn up. As an example, the system for managing the transportation of goods in the transport network is considered in detail.

Keywords: decision-making systems; dynamic structures; dynamic relations; algebra of cyclograms; planning systems; resource management.

For citation

Geida A. S., Fedorchenko L. N., Afanasieva I. V., Khasanov D. S. Dynamic Relationships in Knowledge Processing Tasks // Bulletin of Buryat State University. Mathematics, Informatics. 2021. N. 3. Pp. 39–61.

The article was submitted 15.09.2021; approved after reviewing 15.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.