

**МОДЕЛЬ РЕФЛЕКСИВНОГО АГЕНТА В КОНТУРЕ
УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ**

Аннотация. В работе приводится математическая модель рефлексивного агента, предназначенного для управления сложными системами и технологическими процессами. Дано описание процесса формирования «модели мира» и «собственного поведения» рефлексивного агента. Рассматриваются варианты сходимости рефлексивного процесса.

Ключевые слова: принцип предельных обобщений, рефлексивный агент, собственное поведение, рефлексивные петли.

1. Введение

В последнее время для управления сложными динамическими системами и технологическими процессами все чаще применяются мультиагентные системы [1 - 6]. Лефевр [3] отмечает, что наиболее развитым способом управления является формирование «рефлексивного строения управляемого персонажа» или «оператора осознания». В контуре управления могут использоваться рефлексивные агенты, рефлексивные группы агентов (групповые субъекты), активно-рефлексивные среды [2, 3].

В повторяющемся процессе рекурсивно организованных сенсомоторных актов различения, взаимных возмущений и реакций на возмущения возникают инварианты во взаимоотношениях рефлексивующих систем (агентов, групп, сред) с внешней средой. Основатель кибернетики второго порядка (кибернетики наблюдателя) Гейнц фон Фёрстер (von Foerster) назвал подобные инварианты «собственное поведение» (eigenbehavior) [4]. Фактически, собственное поведение - это неподвижная точка оператора (например, «оператора осознания»), остающаяся неизменной при его действии (в ходе бесконечного числа рекурсий, выстраиваются «собственные значения» – средства связи элементов системы).

В работах [5-7] развиваются подходы к построению моделей когнитивных агентов на основе парадигмы предельных обобщений. Настоящая работа является развитием данных исследований.

Целью данной работы является построение на основе парадигмы предельных обобщений формальной математической модели процесса формирования «собственного поведения» рефлексивного агента, изучение на модели типов сходимости рефлексивного процесса, в частности, рассмотрение процессуального механизма дестабилизации агента в процессе рефлексии.

Постановка задач исследования. Основными задачами исследования являются: построение математической модели процесса формирования «собственного поведения» рефлексивного агента; исследование вариантов сходимости рефлексивного процесса.

2. «Модели мира» и «собственного поведения» агента

Пусть $\{\tau\}$ - множество элементарных тестов, с помощью которых описываются все факторы, обстоятельства и явления, имеющие отношение к изучаемой действительности. Конкретный результат теста τ будем обозначать через $\underline{\tau}$. Результаты тестов могут выбираться (формироваться) из разных доменов (множеств значений со связями), которые образуют оргграф доменов $G(\tau) = \{T \rightarrow T'\}_{\tau}$. Для фиксации того, что в качестве множества результатов теста τ используется домен T , будем использовать нотацию: τ / T . Используя разные домены, можно управлять общностью (масштабом) результата одного и того же теста. В совокупности оргграфы доменов образуют Банк тестов. Различные комбинации доменов для всех тестов определяют различные уровни общности описания прецедентов [5].

Пусть деятельность агента связана с решением множества Z -задач, где $Z = \{1, \dots, N_Z\}$ – множество кодов заключений, связанных с диагностикой состояния оборудования или процесса, выбором варианта прогноза или управления [5 - 7]. В процессе обучения агента для каждой Z -задачи формируется база прецедентов с известными исходами $\Omega(Z) = \{\alpha(\{\underline{\tau} / T_0\}, \underline{z} / Z)\}$, где T_0 – базовые домены. Без ограничения общности положим, что каждый тест входит в описание прецедента один раз. Кортеж $K = \langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$ образует контекст Z -задачи.

Идеальной закономерностью V в рамках контекста K называется совокупность значений тестов, позволяющая однозначно установить заключение:

$$V = (\{\underline{a} / A\} \rightarrow \underline{z} / Z), \quad \exists \alpha(\{\underline{\tau} / T\}_{\alpha}, \underline{z} / Z) \in \Omega(Z) : \{\underline{a} / A\} \subseteq \{\underline{\tau} / T\}_{\alpha}. \quad (1)$$

Синдромом S называется избыточная закономерность, а *предельным синдромом* S^* называется синдром, который нельзя обобщить ни по одному входящему тесту.

Будем говорить, что закономерность $V'(\{\underline{a} / A'\}, \underline{z} / Z)$ *доминирует* закономерность $V(\{\underline{a} / A\}, \underline{z} / Z)$, если $\{a\}' \subseteq \{a\}$, $\forall a \in \{a\}' : A \leq A'$ и выполняется хотя бы одно из условий: а) $|\{a\}'| < |\{a\}|$; б) $\exists a \in \{a\}' : A < A'$.

Множество всех закономерностей в рамках контекста K обозначим через $\{V\}_{Full}$, множество всех синдромов обозначим через $\{S\}_{Full}$, а множество всех предельных синдромов обозначим $\{S^*\}_{Full}$. Ясно, что $\{S^*\}_{Full} \subseteq \{S\}_{Full} \subseteq \{V\}_{Full}$.

Совокупность закономерностей $\{V\}$ образует *модель знаний*, если она позволяет определить заключение, как минимум, для любой ситуации действительности из $\Omega(\{\underline{\tau} / T_0\}, Z)$ [6].

Будем говорить, что модель знаний $\{V'\}$ *доминирует модель знаний* $\{V\}$, если она применима к большему числу набросков прецедентов из $\Omega(Z)$, включая и те наброски, к которым применима $\{V\}$. Факт доминирования будем отражать нотацией $\{V'\} > \{V\}$. Будем говорить, что модели знаний $\{V'\}$ и $\{V\}$ эквивалентны в плане доминирования, если они применимы к одному и тому же множеству набросков прецедентов. Факт эквивалентности в плане доминирования будем отражать нотацией $\{V'\} \sim \{V\}$. Если для модели знаний $\{V\}$ не существует доминирующая модель, то будем говорить, что она недоминируема. Если между двумя моделями знаний $\{V'\}$ и $\{V\}$ не выполняется отношение доминирования и они не эквивалентны в плане доминирования, то будем говорить, что такие модели знаний несравнимы между собой в плане доминирования. Данный факт будем отражать нотацией $\{V'\} > < \{V\}$.

Большой практический интерес представляет поиск всех минимальных (неизбыточных) по составу моделей знаний, которые принадлежат $\{S^*\}_{Full}$ и эквивалентны по доминированию $\{S^*\}_{Full}$. Такие модели знаний обозначим $\{S^*\}_{Full-Min}$ [5, 6].

Элементарной операцией обобщения Φ^1 назовем переход $V \rightarrow V'$, в котором обобщается значение лишь одного из тестов закономерности V по схеме $A \rightarrow A'$ (родитель - потомок). Элементарной операцией редукции Φ^2 назовем переход $V \rightarrow V'$, при котором исключается один из тестов закономерности V . Суть операции Φ^3 состоит в исключении какой-либо закономерности V из модели знаний $\{V\}$ при условии, что $\{V\}' = \{V\} \setminus V$ эквивалентна в плане доминирования $\{V\}$. Операции $\{\Phi^1\}$ и $\{\Phi^2\}$ принципиально отличаются от $\{\Phi^3\}$, так как они порождают новые закономерности, что может привести к повышению уровня доминирования.

Пусть фиксирован контекст K . На множестве операций $\{\Phi^V\} = \{\Phi^1\} \cup \{\Phi^2\}$ определим когнитивный аналог оператора Хатчинсона: $W(\{V\}) = \{W(V) \mid V \in \{V\}\}$. Важно то, что $W(\{V\}) \geq \{V\}$, т.е. уровень доминирования не уменьшается, несмотря на диссипацию информации.

Если $W^{\circ n}$ - композиция порядка n оператора W , то последовательность множеств, полученную в результате итерирования $\{V\}$, т.е. $\{\{V\}, W(\{V\}), W^{\circ 2}(\{V\}), \dots, W^{\circ n}(\{V\}), \dots\}$, назовем *смысловой орбитой* $\{V\}$ [6].

Можно показать, что для $\{V\}_0 = \{\{\tau / T_0\}_\alpha \rightarrow z_\alpha \mid \alpha \in \Omega\}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} W^{\circ n}(\{V\}_0) = \{S^*\}_{Full}, \quad (2)$$

Пусть $\{V\}$ произвольная модель знаний, тогда сопряженное множество всех минимальных по составу моделей знаний, которые принадлежат $\{V\}$ и эквивалентны по доминированию $\{V\}$, обозначим $\{V\} \downarrow \{\{V\}_{Min}\}$, где « \downarrow » – полная операция локализации (неполная операция локализации позволяет найти только часть сопряженных моделей). Каждая модель $\{V\}_{Min}$ является аттрактором следующего динамического процесса локализации (при фиксированном K):

$$\{V\}_{n+1} = \Phi_{\sigma_n}(\{V\}_n, \Omega(Z), \{G(\tau)\}), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$\{V\}_0 = \{V\}, \quad \Phi_{\sigma_n} \in \{\Phi^3\}_n, \quad |\{\Phi^3\}_n| = |\{V\}_n|,$$

где Φ_{σ_n} выбирается из $\{\Phi^3\}_n$ с вероятностью p_{σ_n} (сумма всех вероятностей равна единице). Если выбранную закономерность нельзя удалить, то случайным образом выбирается другая закономерность из оставшихся и т.д. Процесс (3) останавливается только тогда, когда нельзя удалить ни одну закономерность из $\{V\}_n$ с сохранением уровня доминирования. Если аттрактор процесса обозначить $\{V\}_\infty$, то ясно, что $\{V\}_\infty \sim \{V\}_0$.

Если подставить $\{V\}_0 = \{S^*\}_{Full}$ в уравнение (3), то аттрактором динамического процесса (3) будет избыточная предельная модель знаний $\{S^*\}_{Full-Min}$. Совокупность аттракторов всех процессов (3) совпадает с полным набором всех избыточных предельных моделей знаний $\{\{S^*\}_{Full-Min}\}$ [6].

3. Рефлексивные петли. Анализ динамики моделей поведения

В предыдущем разделе были установлены теоретически достижимые пределы когнитивной эволюции. Рассмотрим особенности реальных рефлексивных процессов.

Опишем рефлексивную петлю в рамках произвольной Z -задачи. Пусть в интервал времени $n=0$ фиксирован контекст K . *Локальной моделью мира* (Local World Model - LWM) агента в рамках Z -задачи в n -ый интервал времени назовем кортеж:

$$\begin{aligned} LWM_Z(n) = \langle K, & \quad W^{on}(\{V\}_0), & \quad W^{on}(\{V\}_0) \downarrow \{\{V\}_{Min}\}, \\ EB_Z(n) = \{V\}_{Min} \rangle, & & \end{aligned} \quad (4)$$

где $EB_Z(n)$ – текущая активная модель собственного поведения (EigenBehavior), которая ситуативно выбирается из полного набора $\{\{V\}_{Min}\}$. Для множества $W^{on}(\{V\}_0)$ введем обозначение $XB_Z(n)$ (eXtended Behavior).

Рефлексивная петля I-го типа (РП1) при фиксированном контексте K состоит из двух последовательных фаз:

1. Фаза расширения: $XB_Z(n+1) = W(XB_Z(n))$.

2. Фаза локализации: а) $XV_Z(n+1) \downarrow \{\{V\}_{\text{Min}}\}$; б) $EV_Z(n+1) = \{V\}_{\text{Min}}$.

Рассмотрим основные свойства динамического процесса на основе РП1. Прежде всего, рекурсивно происходит расширение фазового пространства когнитивной системы (пространства идеальных закономерностей). Процесс локализации при благоприятных условиях (достаточности энергии) имеет естественный предел в виде: $XV_Z(\infty) = \{S^*\}_{\text{Full-Min}}$; $EV_Z(\infty) = \{S^*\}_{\text{Full-Min}}$. Это предельный опыт, который можно достичь при фиксированном контексте K .

В результате жизнедеятельности агента на вход поступит поток различных Z -задач (распознавания, управления и т.д.). РП1 запускается всякий раз, когда агент не может разрешить Z -задачу с помощью $EV_Z(n)$ (или $XV_Z(n)$) для новой ситуации $\alpha(\{\underline{T} / T\}_{\alpha}, z / Z?)$. Отметим, что $\{\underline{T} / T\}_{\alpha}$ может не содержать значений всех тестов и быть высокого уровня обобщения (нечеткости). Завершение текущей РП1 в отведенное время не гарантирует решение задачи. В этом случае нерешенная задача переходит в банк задач $BT = \cup_Z \{\alpha(\{\underline{T} / T\}_{\alpha}, z / Z?)\}$ с меткой «нерешенная». Банк BT является частью глобальной модели мира агента. Если РП1 не завершена в отведенное время, то задача также помещается в BT , а РП1 продолжает выполняться в фоновом режиме (с незначительной энергией и неопределенным временем окончания).

Если завершена любая РП1, то в фоновом режиме пересматриваются все задачи из BT . Это *рефлексивная петля II-го типа* (РП2). Если в фоновом режиме для какой-либо задачи из BT находится решение, то возникает *инсайт* (озарение) – данная задача получает фокус внимания. Если достигнут предел $XV_Z(\infty)$, но текущая задача или какая-либо Z -задача из BT не решена, то запускается корректировка контекста K_Z . Корректировка K_Z запускается всегда, когда появляется фальсифицирующая α . Это *рефлексивная петля III-го типа* (РП3). В итоге могут иметь место двойные и тройные (внутренние) рефлексивные петли.

Фаза расширения в РП1 отражает процессуальный механизм *дестабилизации субъекта* в процессе рефлексии. Процесс дестабилизации позволяет провести аналогию между рекурсивными процессами

рефлексии и процедурами теории возмущений. На основе аналогии можно выделить рефлексивные процессы трех типов:

а) *норма*: имеющейся энергии (ресурсов) достаточно и рефлексивный процесс регулярно сходится к «собственному поведению»;

б) *хаос*: имеющейся энергии (ресурсов) недостаточно для фазы локализации, процесс не сходится к «собственному поведению»; рефлексивные петли не стягиваются;

в) *смешанная альтернатива*: так называемый асимптотический ряд теории возмущений. Его поведение необычно — на нескольких первых шагах (иногда довольно многочисленных) наблюдается процесс, сходящийся к определенному результату (рефлексивные петли стягиваются), но последующие итерации приводят не к уточнению, а к ухудшению результата, ряд расходится.

Основной причиной хаоса и асимптотического ряда является нехватка структурной энергии. Важным защитным механизмом от подобных явлений служит *блокировка рефлексии*. Возможность блокировки означает наличие *порога индивидуальной рефлексии*, что позволяет говорить о существовании *оптимума рефлексивности* [3] для каждого агента (субъекта).

4. Выводы

Представленная модель позволяет не только создавать когнитивные мультиагентные технологии управления сложными технологическими процессами, но также объяснить многие феномены обучения, накопления опыта, функциональной неустойчивости оператора технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадамшин, Р.А. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний /Р. А. Бадамшин, Б. Г. Ильясов, Л. Р. Черняховская. М. : Машиностроение, 2003. - 240 с.
2. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. - №6 . - С. 45-61.
3. Лефевр В.А. Лекции по теории рефлексивных игр.— М.: «Когито-Центр», 2009.— 218 с.
4. Von Foerster H. Principles of self-organization in socio managerial context // Self-organization and management of social system / Ulrich H., ed. - Springer Series in Synergetics: Springer-Verlag. - Vol.26. - 1984.

5. Прокопчук Ю. А. Принцип предельных обобщений: методология, задачи, приложения. Монография. – Дн-вск: ИТМ НАНУ и НКАУ, 2012.-384 с.
6. Прокопчук Ю.А. Модели спонтанной когнитивной динамики // Материалы III Международной научной конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем – OSTIS-2013» (Минск, 21-23 февраля 2013 г.). – Минск: БГУИР, 2013. – С. 251 – 256.
7. Прокопчук Ю.А., Белецкий А.С. Технологический аудит и субоптимизация на основе принципа предельных обобщений // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 82 – 87.