

МОДЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНТЕЛЛЕКТ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Л.К. Птицына д.т.н. профессор, А.А. Лебедева аспирантка

федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)
Санкт-Петербург, Россия, ptitsina_lk@inbox.ru, annalebedeva4@mail.ru

Предлагаемая формализация для образования модельно-аналитического интеллекта мультиагентных систем ориентируется на объектно-ориентированный подход к проектированию информационных систем.

Модельно-аналитический интеллект мультиагентных систем формируется на основе агентно-ориентированного подхода [1]. Благодаря выбору этого подхода обеспечиваются следующие преимущества: унификация моделей и этапов их разработки для широкого класса систем; многообразие ассортимента программных инструментов для интеграции с распространёнными языками и средами программирования. При разработке модельно-аналитического интеллекта изменения состояний подпроцессов функционирования мультиагентных систем отражаются расширенными диаграммами конечного автомата [2]. Для моделирования выделяются автоматы поведения, которые относятся к моделям типа «состояние – переход». Математический аппарат определения компонентов модельно-аналитического интеллекта мультиагентных систем базируется на системе матрично-векторных преобразований параметрического описания стохастических профилей мультиагентных систем.

Определение качества функционирования агента из состава многоагентной системы ориентируется на полный стохастический профиль выполнения функционального воздействия на окружающую среду, запланированного системой. Подобный профиль в полной мере характеризуется плотностью вероятности времени выполнения воздействия, вследствие чего эта характеристика выбирается базовым показателем качества. Для определения представленных характеристик разрабатывается метод анализа построенной расширенной объектно-ориентированной модели, приведённой на рисунке.

Математические объекты, фигурирующие в модели, имеют следующий смысл:

- $u_{occ}(k_{occ})$, $k_{occ} = 1, 2, \dots, K_{occ}$ – плотность распределения вероятностей k_{occ} дискретного времени выполнения действия по определению состояния среды;
- $u_{phi}(k_{phi})$, $k_{phi} = 1, 2, \dots, K_{phi}$ – плотность распределения вероятностей k_{phi} дискретного времени выполнения действия по формированию информации;
- $u_{fz}(k_{fz})$, $k_{fz} = 1, 2, \dots, K_{fz}$ – плотность распределения вероятностей k_{fz} дискретного времени выполнения действия по формированию информации;
- $u_{mc}(k_{mc})$, $k_{mc} = 1, 2, \dots, K_{mc}$ – плотность распределения вероятностей k_{mc} дискретного времени выполнения действия по моделированию среды;
- $u_{n1}(k_{n1})$, $k_{n1} = 1, 2, \dots, K_{n1}$ – плотность распределения вероятностей k_{n1} дискретного времени выполнения действия по предварительному планированию;
- $u_{ka1}(k_{ka1})$, $k_{ka1} = 1, 2, \dots, K_{ka1}$ – плотность распределения вероятностей k_{ka1} дискретного времени выполнения действия по установлению связи с другим агентом;

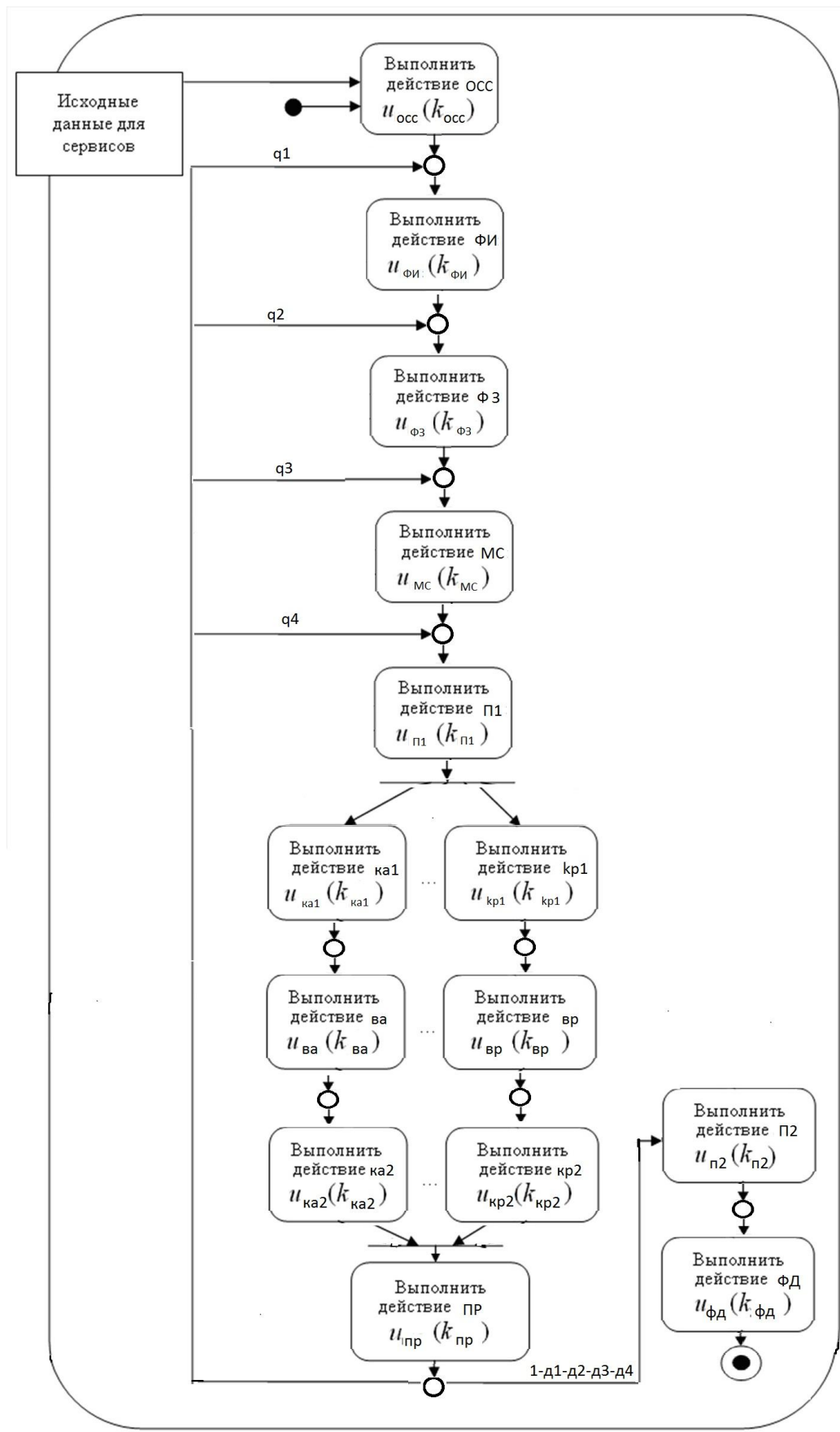


Рисунок – Расширенная объектно-ориентированная модель функционирования агента из состава многоагентной системы

- $u_{\text{ва}}(k_{\text{ва}})$, $k_{\text{ва}} = 1, 2, \dots, K_{\text{ва}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{ва}}$ дискретного времени выполнения действия по передаче данных, информации или знаний от другого агента;
- $u_{\text{ка2}}(k_{\text{ка2}})$, $k_{\text{ка2}} = 1, 2, \dots, K_{\text{ка2}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{ка2}}$ дискретного времени выполнения действия по разрыву связи с другим агентом;
- $u_{\text{кр1}}(k_{\text{кр1}})$, $k_{\text{кр1}} = 1, 2, \dots, K_{\text{кр1}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{кр1}}$ дискретного времени выполнения действия по установлению связи с информационным ресурсом;
- $u_{\text{вп}}(k_{\text{вп}})$, $k_{\text{вп}} = 1, 2, \dots, K_{\text{вп}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{вп}}$ дискретного времени выполнения действия по передаче данных, информации или знаний от информационного ресурса;
- $u_{\text{кр2}}(k_{\text{кр2}})$, $k_{\text{кр2}} = 1, 2, \dots, K_{\text{кр2}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{кр2}}$ дискретного времени выполнения действия по разрыву связи с информационным ресурсом;
- $u_{\text{нр}}(k_{\text{нр}})$, $k_{\text{нр}} = 1, 2, \dots, K_{\text{нр}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{нр}}$ дискретного времени принятия решения по уточнению информации или знания, или модели среды;
- $u_{\text{н2}}(k_{\text{н2}})$, $k_{\text{н2}} = 1, 2, \dots, K_{\text{н2}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{н2}}$ дискретного времени выполнения действия по уточнённому планированию;
- $u_{\text{фд}}(k_{\text{фд}})$, $k_{\text{фд}} = 1, 2, \dots, K_{\text{фд}}$ – плотность распределения вероятностей $k_{\text{фд}}$ дискретного времени выполнения функционального действия моделируемого агента;
- q_1 – вероятность уточнения информации после взаимодействия с информационным ресурсом и другим агентом;
- q_2 – вероятность уточнения знания после взаимодействия с информационным ресурсом и другим агентом;
- q_3 – вероятность уточнения модели среды после взаимодействия с информационным ресурсом и другим агентом;
- q_4 – вероятность уточнения плана после взаимодействия с информационным ресурсом и другим агентом.

Построенная расширенная объектно-ориентированная модель функционирования агента из состава многоагентной системы является основой для определения её динамических характеристик.

После определения базового показателя качества функционирования агента из состава многоагентной системы согласно теории вероятностей могут находиться любые показатели, представляющие собой числовые характеристики времени выполнения воздействия.

В начале анализа найдём плотность вероятностей дискретного времени двух последовательных действий: действия по установлению связи с другим агентом и действия по передаче данных, информации или знаний от другого агента:

$$u(k_{\text{кв}}) = \sum_{k_{\text{ка1}}=1}^{K_{\text{ка1}}} u_{\text{ка1}}(k_{\text{ка1}}) u_{\text{ва}}(k_{\text{кв}} - k_{\text{ка1}}), \quad (1)$$

$$k_{\text{кв}} = \min(k_{\text{ка1}} + k_{\text{ва}}), \dots, \max(k_{\text{ка1}} + k_{\text{ва}}) .$$

Переопределим плотность вероятностей с учётом действия по разрыву связи с другим агентом:

$$u(k_{\text{квк}}) = \sum_{k_{\text{кв}}} u_{\text{кв}}(k_{\text{кв}}) u_{\text{ка2}}(k_{\text{квк}} - k_{\text{кв}}), \quad (2)$$

$$k_{квк} = \min(k_{кв} + k_{ка2}), \dots, \max(k_{кв} + k_{ка2}).$$

Перейдём к анализу взаимодействия с информационным ресурсом. В этом случае выразим плотность вероятностей дискретного времени двух последовательных действий: действия по установлению связи с информационным ресурсом и действия по передаче данных, информации или знаний от информационного ресурса:

$$u(k_{pв}) = \sum_{k_{kp1}=1}^{K_{kp1}} u_{kp1}(k_{kp1})u_{вp}(k_{pв} - k_{kp1}), \quad (3)$$

$$k_{pв} = \min(k_{kp1} + k_{вp}), \dots, \max(k_{kp1} + k_{вp}).$$

При анализе взаимодействия с информационным ресурсом учитывается и действие по разрыву связи с информационным ресурсом:

$$u(k_{крк}) = \sum_{k_{pв}} u_{pв}(k_{pв})u_{кр2}(k_{крк} - k_{pв}), \quad (4)$$

$$k_{крк} = \min(k_{pв} + k_{кр2}), \dots, \max(k_{pв} + k_{кр2}).$$

Далее формируется плотность вероятностей длительности параллельных действий:

$$u_{\wedge}(k_{\wedge}) = u_{квк}(k_{квк} = k_{\wedge}) \sum_{k_{крк} \leq k_{\wedge}} u_{крк}(k_{квк}) + u_{крк}(k_{крк} = k_{\wedge}) \sum_{k_{квк} < k_{\wedge}} u_{квк}(k_{квк}), \quad (5)$$

$$k_{\wedge} = \max(\min k_{квк}, \min k_{крк}), \dots, \max(\max k_{квк}, \max k_{крк}).$$

При анализе принимается во внимание длительность предварительного планирования:

$$u(k_{n\wedge}) = \sum_{k_{n1}} u_{n1}(k_{n1})u_{\wedge}(k_{n\wedge} - k_{n1}), \quad (6)$$

$$k_{n\wedge} = \min(k_{n1} + k_{\wedge}), \dots, \max(k_{n1} + k_{\wedge}).$$

Далее находится плотность вероятностей дискретного времени выполнения последовательных действий, приводящих к принятию решения по уточнению информации или знания, или модели среды:

$$u(k_p) = \sum_{k_{n\wedge}} u_{n\wedge}(k_{n\wedge})u_{np}(k_p - k_{n\wedge}), \quad (7)$$

$$k_p = \min(k_{n\wedge} + k_{np}), \dots, \max(k_{n\wedge} + k_{np}).$$

Последующие операции разрабатываемого метода ориентируются на анализ временного профиля, учитывающего возврат к предварительному планированию.

Согласно методу определения динамических характеристик интеллектуальных агентов при выполнении действий с возвратами необходимо зафиксировать исходную

плотность распределения вероятностей эквивалентного последовательного процесса. В данном случае анализируемой модели это четвёртая ситуация, связанная с возвратом из-за воздействия инфокоммуникационной среды, т. е. $i = 4$. Следовательно

$$f1_i(k_i), k_i = 1, 2, \dots, K_i, i = 4.$$

Тогда

$$\begin{aligned} f1_4(k_4) &= u(k_p), k_4 = 1, 2, \dots, K_4, \\ K_4 &= \max(k_{n\wedge} + k_{np}). \end{aligned} \quad (8)$$

Причём, согласно (7) при $k_4 < \min(k_{n\wedge} + k_{np})$ $f1_4(k_4) = 0$.

С учётом уточнения исходной информации матричное описание процесса с вероятным возвратом принимает следующий вид

$$P_{4o} = \begin{bmatrix} 0 & f1_4(N) & f1_4(N-1) & f1_4(N-2) & f1_4(N-3) & \dots & f1_4(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ q_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (1-q_4) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $N = K_4$.

По описанию (9) находится плотность распределения вероятностей

$$\begin{aligned} u_{4o}(k_{4o}) &= P_{4o,1,N+2}^{(k_{4o})} - P_{4o,1,N+2}^{(k_{4o}-1)}, \\ k_{4o} &= 1, 2, \dots, N, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

где $P_{4o,1,N+2}^{(k_{4o})}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент k_{4o} -ой степени матрицы P_{4o} ;

$P_{4o,1,N+2}^{(k_{4o}-1)}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент $(k_{4o}-1)$ -ой степени матрицы P_{4o} ;

k_{4o} – дискретное время выполнения обобщённого действия с четвёртым вероятным возвратом.

$$\begin{aligned} u(k_{M4}) &= \sum_{k_{Mc}} u_{Mc}(k_{Mc}) u_{4o}(k_{M4} - k_{Mc}), \\ k_{M4} &= \min(k_{Mc} + k_{4o}), \dots, \max(k_{Mc} + k_{4o}). \end{aligned} \quad (11)$$

Далее проанализируем третью ситуацию, связанную с возвратом из-за воздействия инфокоммуникационной среды, т. е. $i = 3$. В этой ситуации

$$f1_i(k_i), k_i = 1, 2, \dots, K_i, i = 3.$$

Тогда

$$\begin{aligned} f1_3(k_3) &= u(k_{m4}), k_3 = 1, 2, \dots, K_3, \\ K_3 &= \max(k_{mc} + k_{4o}). \end{aligned} \quad (12)$$

Причём, согласно (12) при $k_3 < \min(k_{mc} + k_{4o})$ $f1_3(k_3) = 0$.

С учётом уточнения исходной информации матричное описание процесса с третьим вероятным возвратом принимает следующий вид

$$P_{3o} = \begin{bmatrix} 0 & f1_3(N) & f1_3(N-1) & f1_3(N-2) & f1_3(N-3) & \dots & f1_3(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ q_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (1-q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $N = K_3$.

По описанию (13) находится плотность распределения вероятностей

$$\begin{aligned} u_{3o}(k_{3o}) &= P_{3o,1,N+2}^{(k_{3o})} - P_{3o,1,N+2}^{(k_{3o}-1)}, \\ k_{3o} &= 1, 2, \dots, N, \dots \end{aligned} \quad (14)$$

где $P_{3o,1,N+2}^{(k_{3o})}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент k_{3o} -ой степени матрицы P_{3o} ;

$P_{3o,1,N+2}^{(k_{3o}-1)}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент $(k_{3o}-1)$ -ой степени матрицы P_{3o} ;

k_{3o} – дискретное время выполнения обобщённого действия с третьим вероятным возвратом.

$$\begin{aligned} u(k_{\phi 3}) &= \sum_{k_{\phi 3}} u_{\phi 3}(k_{\phi 3}) u_{3o}(k_{\phi 3} - k_{3o}), \\ k_{\phi 3} &= \min(k_{\phi 3} + k_{3o}), \dots, \max(k_{\phi 3} + k_{3o}). \end{aligned} \quad (15)$$

Теперь проанализируем вторую ситуацию, связанную с возвратом из-за воздействия инфокоммуникационной среды, т. е. $i = 2$. В этой ситуации

$$f1_i(k_i), k_i = 1, 2, \dots, K_i, i = 2.$$

Применительно к рассматриваемой ситуации

$$\begin{aligned} f1_2(k_2) &= u(k_{\phi 3}), k_2 = 1, 2, \dots, K_2, \\ K_2 &= \max(k_{\phi 3} + k_{3o}). \end{aligned} \quad (16)$$

В соответствии с (16) при $k_2 < \min(k_{\phi 3} + k_{3o})$ $f1_2(k_2) = 0$.

С учётом уточнения исходной информации матричное описание процесса со вторым вероятным возвратом принимает следующий вид

$$P_{2o} = \begin{bmatrix} 0 & f1_2(N) & f1_2(N-1) & f1_2(N-2) & f1_2(N-3) & \dots & f1_2(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (1-q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $N = K_2$.

По описанию (17) находится плотность распределения вероятностей

$$\begin{aligned} u_{2o}(k_{2o}) &= P_{2o,1,N+2}^{(k_{2o})} - P_{2o,1,N+2}^{(k_{2o}-1)}, \\ k_{2o} &= 1, 2, \dots, N, \dots \end{aligned} \quad (18)$$

где $P_{2o,1,N+2}^{(k_{2o})}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент k_{2o} -ой степени матрицы P_{2o} ;

$P_{2o,1,N+2}^{(k_{2o}-1)}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент $(k_{2o}-1)$ -ой степени матрицы P_{2o} ;

k_{2o} – дискретное время выполнения обобщённого действия со вторым вероятным возвратом.

$$u(k_{\phi 2}) = \sum_{k_{\phi u}} u_{\phi u}(k_{\phi u}) u_{2o}(k_{\phi 2} - k_{\phi u}), \quad (19)$$

$$k_{\phi 2} = \min(k_{\phi u} + k_{2o}), \dots, \max(k_{\phi u} + k_{2o}).$$

Проанализируем первую ситуацию, связанную с возвратом из-за воздействия инфокоммуникационной среды, т. е. $i = 1$. В этой ситуации

$$f1_i(k_i), k_i = 1, 2, \dots, K_i, i = 1.$$

Применительно к рассматриваемой ситуации

$$f_1(k_1) = u(k_{\phi 2}), k_1 = 1, 2, \dots, K_1, \quad (20)$$

$$K_1 = \max(k_{\phi u} + k_{2o}).$$

В соответствии с (20) при $k_1 < \min(k_{\phi u} + k_{2o})$ $f_1(k_1) = 0$.

С учётом уточнения исходной информации матричное описание процесса с первым вероятным возвратом принимает следующий вид

$$P_{1o} = \begin{bmatrix} 0 & f_1(N) & f_1(N-1) & f_1(N-2) & f_1(N-3) & \dots & f_1(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & (1-q_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где $N = K_1$.

По описанию (21) находится плотность распределения вероятностей

$$u_{1o}(k_{1o}) = P_{1o,1,N+2}^{(k_{1o})} - P_{1o,1,N+2}^{(k_{1o}-1)}, \quad (22)$$

$$k_{1o} = 1, 2, \dots, N, \dots$$

где $P_{1o,1,N+2}^{(k_{1o})}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент k_{1o} -ой степени матрицы P_{1o} ;

$P_{1o,1,N+2}^{(k_{1o}-1)}$ – $(1, (N+2))$ -ой элемент $(k_{1o}-1)$ -ой степени матрицы P_{1o} ;

k_{1o} – дискретное время выполнения обобщённого действия с первым вероятным возвратом.

Далее в статистическом профиле учитывается случайная длительность действия по определению состояния среды:

$$u(k_{\phi 1}) = \sum_{k_{occ}} u_{occ}(k_{occ}) u_{1o}(k_{\phi 1} - k_{occ}), \quad (23)$$

$$k_{\phi 1} = \min(k_{occ} + k_{1o}), \dots, \max(k_{occ} + k_{1o}).$$

Затем принимается во внимание случайная длительность действий по уточнённому планированию

$$u(k_{on}) = \sum_{k_{\phi 1}} u(k_{\phi 1}) u_{n2}(k_{on} - k_{\phi 1}), \quad (24)$$

$$k_{on} = \min(k_{\phi 1} + k_{n2}), \dots, \max(k_{\phi 1} + k_{n2}).$$

На завершающем этапе разработанного метода определяется плотность вероятностей времени воздействия информационного агента на окружающую среду, запланированного многоагентной системой:

$$u(k_{оф}) = \sum_{k_{он}} u(k_{он}) u_{фд}(k_{оф} - k_{он}), \quad (25)$$

$$k_{оф} = \min(k_{он} + k_{фд}), \dots, \max(k_{он} + k_{фд}).$$

На основании (25) находятся и другие показатели качества функционирования агента из состава многоагентной системы:

$$E[k_{оф}] = \sum_{\min k_{оф}}^{\max k_{оф}} k_{оф} u(k_{оф}), \quad (26)$$

$$D[k_{оф}] = \sum_{\min k_{оф}}^{\max k_{оф}} (k_{оф} - E[k_{оф}])^2 u(k_{оф}), \quad (27)$$

$$R(k_{оф} > C) = 1 - \sum_{\min k_{оф}}^C u(k_{оф}), \quad (28)$$

где C – верхняя граница допустимого времени воздействия агента на внешнюю среду;
 $E[k_{оф}]$, $D[k_{оф}]$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия времени воздействия агента на внешнюю среду;
 $R(k_{оф} > C)$ – риск срыва временного регламента информационного агента из состава многоагентной системы.

Система соотношений (1) – (28) является математическим обеспечением процесса анализа качества функционирования информационного агента из состава многоагентной системы, описываемого построенной расширенной объектно-ориентированной моделью.

Список используемой литературы

1. Птицына, Л. К., Лебедева, А. А. Модельно-аналитическое обеспечение информационных интеллектуальных агентов с динамической синхронизацией их действий // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. H&ES RESEARCH. – №6. – 2014. – С. 68 – 71.
2. Птицына, Л. К., Лебедева, А. А. Аналитические компоненты информационной технологии формирования динамических характеристик запросов интеллектуальных агентов с подтверждением // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. H&ES RESEARCH. – №1. – 2015. – С. 32 – 36.

Model-Analytical Intelligence of Multi-Agent Systems, Ptitsyna L.K., Lebedeva A. A. The formalization for creation of model-analytical intelligence of multi-agent systems is oriented on object-oriented approach to information systems engineering.