

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАЛОГОВОГО РЕЖИМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ

Е.В. Ларкин

Исследуется процесс дистанционного управления мобильным роботом. Построен сеть Петри-Маркова для моделирования диалогового режима. Показано, что для моделирования последовательности действий человека-оператора ЭВМ пульта управления и бортовой ЭВМ может быть применена теория полумарковских процессов. Из общей модели алгоритмов генерации транзакций получен полумарковский процесс, который включает только состояния генерации. Полумарковский процесс преобразован в Марковский с непрерывным временем, который описывает функционирование системы в целом. Показано, что реальный поток транзакций представляет собой результат «соревнования». Предложена итерационная процедура для оценки параметров потоков транзакций для всех уровней управления.

Ключевые слова: мобильный робот, диалог, бортовая ЭВМ, человек-оператор, полумарковский процесс, сеть Петри-Маркова, поток транзакций, «соревнование».

1. Введение. Мобильные роботы (МР) в настоящее время достаточно широко применяются при мониторинге окружающей обстановки в системах антитеррора, экологии, разведки, при ликвидации последствий техногенных катастроф и т.п. [1, 2]. Основная особенность современного состояния мобильной робототехники заключается в ограниченности искусственного интеллекта роботов, что лишает МР реальной автономности. Поэтому из существующих естественных уровней иерархии (стратегический, тактический, функционально-логический) в системах управления реализуются задачи двух нижних уровней [3]:

на тактическом уровне МР получает команды на решение задач, модифицирует генетический алгоритм решения задач с учетом состояния узлов и блоков работа, а также внешних факторов и выдает исполнительные команды на узлы и блоки для их реализации;

на функционально-логическом уровне реализуются команды управления узлами и блоками, замыкаются обратный связи, осуществляется взаимоувязка работы бортового оборудования по времени, энергетике и другим ресурсам, производится оценка состояния узлов и блоков, работа в целом, а также окружающей обстановки.

Отличительной особенностью задач тактического и функционально-логического уровней являются достаточно жесткие требования ко времени опроса датчиков и исполнительных узлов, а также времени задержки распространения сигнала управления. Кроме того, имеется проблема согласования во времени функционирования различных бортовых систем работа. Особенно возрастает сложность задач перечисленных уровней если контроль состояния МР осуществляется в диалоге с оператором, воз-

действующим на МР в интерактивном диалоге управляющей ЭВМ. Определение временного фактора управления является актуальной и к настоящему времени не решенной задачей.

2. Общая модель процесса управления. Принцип управления мобильным роботом приведен на рис. 1, а.

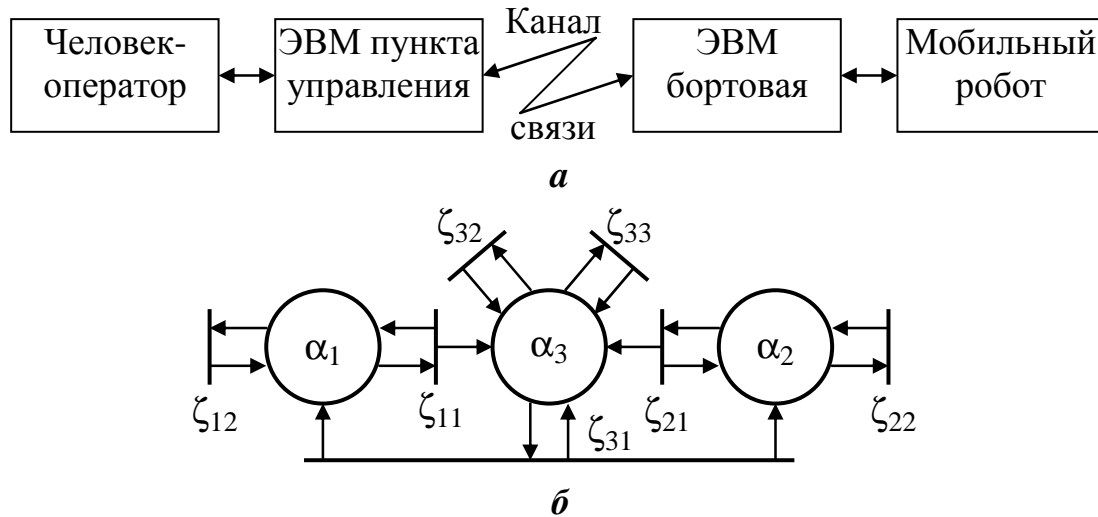


Рис. 1. Общая схема управления мобильным роботом:
а – функциональная схема управления МР;
б – сеть Петри-Маркова, описывающая процесс

МР управляется человеком-оператором, который находится на удаленном пункте управления, и в интерактивном диалоге с ЭВМ (ЭВМПУ) генерирует поток команд, которые по каналу связи передаются на бортовую ЭВМ (ЭВМБ) робота. В ЭВМБ внешние команды декодируются, и реализуется собственно тактический и функционально-логический уровни управления, что приводит к изменению состояний узлов и механизмов робота. Информация о состоянии МР вместе с информацией о состоянии окружающей среды передается через ЭВМБ, канал связи и ЭВМПУ человеку-оператору, управляющему мобильным роботом.

Вследствие того, что три субъекта - оператор, ЭВМБ и ЭВМПУ находятся во взаимодействии, первичная модель, поясняющая принцип управления может быть получена с применением сети Петри-Маркова (СПМ), показанной на рис. 1 б [4]. Сеть Петри-Маркова описывается следующим выражением:

$$\sigma = \{A, Z, \rho_{\alpha\zeta}, \rho_{\zeta\alpha}, \Lambda\}, \quad (1)$$

где $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ - множество позиций (мест), описывающих алгоритмы функционирования взаимодействующих субъектов; $Z = \{\zeta_{11}, \zeta_{12}, \zeta_{21}, \zeta_{22}, \zeta_{31}, \zeta_{32}, \zeta_{33}\}$ - множество переходов, описывающих взаимодействие субъектов; $\rho_{\alpha\zeta}$ - матрица смежности, отображающая

множество позиций в множество переходов, размером 3×3 ; $\rho_{\zeta\alpha}$ - матрица смежности, отображающая множество переходов в множество позиций, размером 3×3 ; Λ - матрица логических условий выполнения полушагов из переходов в позиции;

$$\rho_{\alpha\zeta} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

11 12 31 32 33 21 22

$$\rho_{\zeta\alpha} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} [\alpha_1, \zeta_{11}] & 0 & [\alpha_1, \zeta_{11}] \\ [\alpha_1, \zeta_{12}] & 0 & 0 \\ [\alpha_3, \zeta_{31}] & [\alpha_3, \zeta_{31}] & [\alpha_3, \zeta_{31}] \\ 0 & 0 & [\alpha_3, \zeta_{32}] \\ 0 & 0 & [\alpha_3, \zeta_{33}] \\ 0 & [\alpha_2, \zeta_{21}] & [\alpha_2, \zeta_{21}] \\ 0 & [\alpha_2, \zeta_{22}] & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где кортежи $[\alpha_m, \zeta_n]$ описывает процедуру выполнения полушагов из позиций α_m в переход ζ_n , $m \in \{1, 2, 3\}$, $n \in \{11, 12, 31, 32, 33, 21, 22\}$.

3. Модели алгоритмов. Позиции $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ описывают последовательности действий следующих субъектов: α_1 - оператора; α_2 - ЭВМБ; α_3 - ЭВМПУ. У оператора последовательность действий реализуется через творческий процесс принятия решений по наблюдаемым состояниям МР и окружающей среды, исполнение инструкций по управлению МР, наставлений, и т.п. В ЭВМБ и ЭВМПУ последовательность действий реализуется естественным образом, через интерпретацию алгоритмов, заложенных в программное обеспечение соответствующих ЭВМ. В любом случае последовательности действий разворачиваются во времени, и после завершения очередного действия переход к одному из следующих возможных действий осуществляется для внешнего наблюдателя случайным образом.

В силу случайности времени выполнения действий и стохастического характера переключений в состояние выполнения следующего действия, естественными моделями, описывающими указанные последовательности, являются полумарковские процессы [5, 6, 7, 8]

$$\alpha_i = \{A_i, r_i, h_i(t)\}, i \in \{1, 2, 3\}, \quad (5)$$

где $A_i = \{a_{1_i}, \dots, a_{j_i}, \dots, a_{J_i}\}$ - множество состояний; $r_i = (r_{j_i, m_i})$ и $h_i(t) = [h_{j_i, m_i}(t)]$ - соответственно матрица смежности, описывающая структуру полумарковского процесса, и полумарковская матрица, обе матрицы имеют размеры $J_i \times J_i$.

В самом общем случае структуры полумарковских процессов представляются матрицами смежности, у которых все элементы равны единице, что соответствует полному графу с петлями. Для элементов полумарковской матрицы справедливы следующие ограничения;

$$\sum_{m_i=1}^{J_i} \int_0^{\infty} h_{j_i, m_i}(t) dt = 1; \frac{h_{j_i, m_i}(t)}{\int_0^{\infty} h_{j_i, m_i}(t) dt} \neq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \delta(t - \tau), \quad (6)$$

где $\delta(t - \tau)$ - смещенная δ -функция Дирака.

Ограничения (6) указывают на то, что процессы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ являются эргодическими.

В соответствии с сетью Петри-Маркова (1) в каждом из полумарковских процессах $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ с множеством состояний A_1, A_2, A_3 , существуют подмножества состояний, которые моделируют транзакции. В полумарковских процессах α_1, α_2 имеется по одному такому подмножеству, при попадании в состояния которого генерируется транзакция в α_3 . Без нарушения общности можно считать, что эти состояния имеют номера с первого по S_i -й, $S_i \leq J_i, i \in \{1, 2\}$. Множества A_1, A_2 имеют вид:

$$A_i = \{a_{1_i}, \dots, a_{S_i}, \dots, a_{S_i}, a_{S_i+1}, \dots, a_{j_i}, \dots, a_{J_i}\}, i \in \{1, 2\}. \quad (7)$$

В полумарковском процессе α_3 имеется два состояния, генерирующих транзакции, одно из них генерирует транзакции в α_1 , а другое генерирует транзакции в α_2 . Указанные состояния имеют номера с первого по S_3 -й, и с (S_3+1) -го по U_3 -й. Таким образом, множество A_3 имеет вид:

$$A_3 = \{a_{1_3}, \dots, a_{S_3}, \dots, a_{S_3}, a_{S_3+1}, \dots, a_{U_3}, \dots, a_{U_3}, a_{U_3+1}, \dots, a_{j_3}, \dots, a_{J_3}\}. \quad (8)$$

Определим параметры потоков транзакций. Для этого упростим полумарковские процессы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ до процессов, которые содержат только состояния генерации транзакций. Для этого в процессах α_1, α_2 расцепим каждое из состояний a_{S_i} на два: стартовое ${}^b a_{S_i}$ и поглощающее ${}^e a_{S_i}$,

$1_i \leq s_i \leq S_i, i \in \{1, 2\}$, а в полумарковском процессе α_3 на стартовое ${}^b a_{s_3}$, ${}^b a_{u_3}$ и поглощающее ${}^e a_{s_3}, {}^e a_{u_3}$ расщепляется каждое из состояний $a_{s_3}, a_{u_3}, 1_3 \leq s_3 \leq S_3, 1_3 \leq u_3 \leq U_3$.

При расщеплении полумарковские процессы α_1, α_2 преобразуются в процессы

$$\alpha'_i = \{A'_i, r'_i, h'_i(t)\}, i \in \{1, 2, 3\}, \quad (9)$$

где

$$A'_i = \left\{ {}^b a_{1_i}, \dots, {}^b a_{s_i}, \dots, {}^b a_{S_i}, a_{S_i+1}, \dots, a_{j_i}, \dots, a_{J_i}, {}^e a_{1_i}, \dots, {}^e a_{s_i}, \dots, {}^e a_{S_i} \right\},$$

$$i \in \{1, 2\};$$

$$A'_3 = \left\{ {}^b a_{1_3}, \dots, {}^b a_{s_3}, \dots, {}^b a_{S_3}, {}^b a_{S_3+1}, \dots, {}^b a_{u_3}, \dots, {}^b a_{U_3}, a_{U_3+1}, \dots, a_{j_3}, \dots, a_{J_3}, {}^e a_{1_3}, \dots, {}^e a_{s_3}, \dots, {}^e a_{S_3}, {}^e a_{S_3+1}, \dots, {}^e a_{u_3}, \dots, {}^e a_{U_3} \right\} \quad (10)$$

Матрицы смежности r' и полумарковская матрица $h'_i(t)$ в (9) имеют размеры $(J_i + S_i) \times (J_i + S_i)$, если $i \in \{1, 2\}$ и $(J_3 + U_3) \times (J_3 + U_3)$, если $i = 3$. Матрицы формируются следующим образом:

столбцы с номерами с 1_i по S_i , если $i \in \{1, 2\}$, и с 1_3 по U_3 , если $i = 3$, переносятся в столбцы с номерами с $J_i + 1_i$ по $J_i + S_i$, если $i \in \{1, 2\}$, и с $J_3 + 1_3$ по $J_3 + U_3$, если $i = 3$;

столбцы с номерами с 1_i по S_i , если $i \in \{1, 2\}$, и с 1_3 по U_3 , если $i = 3$, заполняются нулями;

строки с номерами с $J_i + 1_i$ по $J_i + S_i$, если $i \in \{1, 2\}$, и с $J_3 + 1_3$ по $J_3 + U_3$, если $i = 3$, заполняются нулями.

Полумарковские процессы (9) с расщепленными состояниями перестают быть эргодическими, и для них могут быть найдены плотности распределения и вероятности блужданий от состояния ${}^b a_{m_i}$ до состояния ${}^e a_{n_i}$, где $1_i \leq m_i \leq S_i$, если $i \in \{1, 2\}$, и $1_3 \leq m_i \leq U_3$, если $i = 3$; $J_i + 1 \leq n_i \leq J_i + S_i$, если $i \in \{1, 2\}$, и $J_3 + 1 \leq m_i \leq J_3 + U_3$, если $i = 3$. Плотности распределения и вероятности определяются по зависимостям:

$$h''_{m_i, n_i}(t) = L^{-1} \left[{}^r I_{n_i} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \{L[h'_i(t)]\}^k \cdot {}^c I_{m_i} \right], \quad (11)$$

где L и L^{-1} - соответственно прямое и обратное преобразования Лапласа; ${}^r I_{n_i}$ - вектор-строка, включающий $J_i + S_i$ элементов, если $i \in \{1, 2\}$, и $J_3 + U_3$ элементов, если $i = 3$, n_i -й элемент которого равен единице, а ос-

тальные элементы равны нулю; ${}^c\mathbf{I}_{m_i}$ - вектор-столбец, включающий $J_i + S_i$ элементов, если $i \in \{1, 2\}$, и $J_3 + U_3$ элементов, если $i = 3$, m_i -й элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю;

Вероятность формирования множества возможных траекторий блуждания из состояния m_i в состояние n_i определяется по зависимости:

$$p_{m_i, n_i} = \int_0^{\infty} h''_{m_i, n_i}(t) dt. \quad (12)$$

Плотность распределения, математическое ожидание и дисперсия времени блуждания, из состояния m_i в состояние n_i определяются по известным формулам:

$$f_{m_i, n_i}(t) = \frac{h''_{m_i, n_i}(t)}{p_{m_i, n_i}}; \quad (13)$$

$$T_{m_i, n_i} = \int_0^{\infty} t f_{m_i, n_i}(t) dt; \quad D_{m_i, n_i} = \int_0^{\infty} (t - T_{m_i, n_i})^2 f_{m_i, n_i}(t) dt. \quad (14)$$

Формула (11) должна быть применена для всех возможных сочетаний индексов в паре (m_i, n_i) . В результате формируются полумарковские процессы $\alpha''_1, \alpha''_2, \alpha''_3$, включающие только состояния, моделирующие генерацию транзакций. Каждое переключение процесса в любое сопряженное состояние порождает одну транзакцию. Процессы имеют следующий вид:

$$\alpha''_i = \{A''_i, \mathbf{r}''_i, \mathbf{h}''_i(t)\}, i \in \{1, 2, 3\}, \quad (15)$$

где $A''_i = \{a''_{1_i}, \dots, a''_{m_i}, \dots, a''_{S_i}\}$, если $i \in \{1, 2\}$, и $A''_3 = \{a''_{1_3}, \dots, a''_{m_3}, \dots, a''_{U_3}\}$, если $i = 3$; $\mathbf{r}''_i = (r_{m_i, n_i})$ - матрица смежности, имеющая размеры $S_i \times S_i$, если $i \in \{1, 2\}$ и $U_3 \times U_3$, если $i = 3$; $\mathbf{h}''_i(t) = [h''_{m_i, n_i}(t)]$ полумарковская матрица, имеющая те же самые размеры, что и матрица смежности.

Следует отметить, что полумарковские процессы (15) были получены из эргодических полумарковских процессов (5) путем выполнения эквивалентных преобразований. Поэтому процессы (15) также являются эргодическими. Для эргодических полумарковских процессов справедливо следующее ограничение:

$$\sum_{n_i=1}^{S_i} p_{m_i, n_i} = 1, \text{ если } i \in \{1, 2\}, \text{ и } \sum_{n_i=1}^{U_i} p_{m_i, n_i} = 1, \text{ если } i = 3. \quad (16)$$

Для определения параметров потока транзакций необходимо преобразовать процесс (15) в другую полумарковскую модель, структура которой представлена на рис. 2 сплошными линиями.

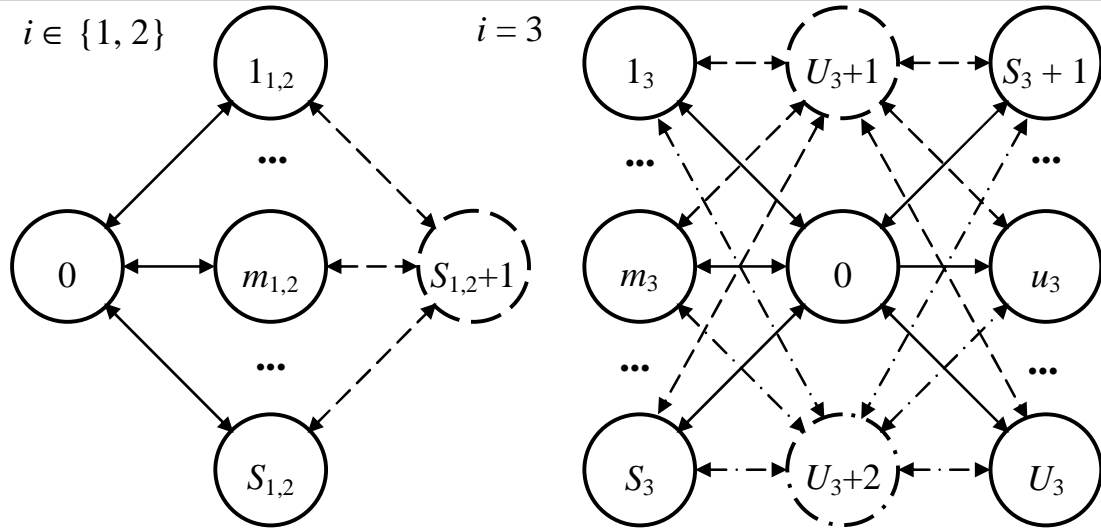


Рис. 2. Структуры абстрактных полумарковских процессов генерации транзакций

В приведенных структурах состояния 0 введены искусственно. Плотность распределения времени пребывания в них определяется δ -функцией Дирака и включение в структуры указанного состояния обусловлено необходимостью переключения процессов в цикле в состояния $a''_{1_i}, \dots, a''_{m_i}, \dots, a''_{S_i}$, если $i \in \{1, 2\}$, или $a''_{1_3}, \dots, a''_{m_3}, \dots, a''_{U_3}$, если $i \in 3$. Соответственно, вероятности переключения из состояния 0 в другие состояния определяются зависимостью

$$\pi_{m_i} = \frac{T_{m_i}}{\tau_{m_i}}, \quad (17)$$

где T_{m_i} - математическое ожидание времени пребывания эргодического полумарковского процесса (15) в состоянии a''_{m_i} ; τ_{m_i} - время возврата в состояние a''_{m_i} .

Плотность распределения времени пребывания эргодического полумарковского процесса (15) в состоянии a''_{m_i} определяется по зависимости

$$f_{m_i}(t) = \sum_{m_i=1}^{M_i} h''_{m_i}(t); \quad (18)$$

$$M_i = \begin{cases} S_i, & \text{when } i \in \{1, 2\}; \\ U_3, & \text{when } i = 3. \end{cases}$$

Математические ожидания времени пребывания эргодического полумарковского процесса (15) в состоянии a''_{m_i} равны

$$T_{m_i} = \int_0^{\infty} t \cdot f_{m_i}(t) dt, \quad (19)$$

Для определения времени возврата τ_{m_i} расщепим состояние a''_{m_i} процесса (15) на ${}^b a''_{m_i}$ и ${}^e a''_{m_i}$. Это осуществляется за счет переноса столбца матрицы $h''_i(t)$ с номером m_i в столбец с номером S_i , если $i \in \{1, 2\}$, и в столбец с номером U_3 , если $i = 3$. Столбец с номером m_i и строка с номером S_i , если $i \in \{1, 2\}$, и с номером U_3 , если $i = 3$, заполняются нулями. В результате этого формируется матрица $\tilde{h}''_i(t)$, имеющая размер $(S_i + 1) \times (S_i + 1)$, если $i \in \{1, 2\}$, и размер $(U_3 + 1) \times (U_3 + 1)$, если $i = 3$. Математическое ожидание определяется по следующей зависимости

$$\tau_{m_i} = \begin{cases} \int_0^\infty t \cdot L^{-1} \left[{}^r I_{S_i+1} \cdot \sum_{k=1}^\infty \{L[\tilde{h}''_i(t)]\}^k \cdot {}^c I_{m_i} \right] dt & \text{when } i \in \{1, 2\}; \\ 0 \\ \int_0^\infty t \cdot L^{-1} \left[{}^r I_{U_3+1} \cdot \sum_{k=1}^\infty \{L[\tilde{h}''_i(t)]\}^k \cdot {}^c I_{m_i} \right] dt & \text{when } i = 3; \\ 0 \end{cases} \quad (20)$$

где ${}^c I_{m_i}$ - вектор-столбец, имеющий размер $S_i + 1$ ($U_i + 1$), m_i -й элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю; ${}^r I_{m_i}$ - вектор-строка, имеющий размер $S_i + 1$ ($U_i + 1$), m_i -й ($(S_i + 1)$ -й ($(U_i + 1)$ -й) элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю.

Полумарковские процессы, структура которых показана на рис. 2 сплошными линиями, имеют вид:

$$\alpha''_i = \{A''_i, r''_i, h''_i(t)\}, i \in \{1, 2, 3\}, \quad (21)$$

где $A''_i = \{a''_{0_i}, a''_{1_i}, \dots, a''_{m_i}, \dots, a''_{S_i}\}$, если $i \in \{1, 2\}$, и $A''_3 = \{a''_{0_3}, a''_{1_3}, \dots, a''_{m_3}, \dots, a''_{U_3}\}$, если $i = 3$; $r''_i = (r_{m_i, n_i})$ - матрица смежности, имеющая размеры $(S_i + 1) \times (S_i + 1)$, если $i \in \{1, 2\}$ и $(U_3 + 1) \times (U_3 + 1)$, если $i = 3$; $h''_i(t) = [h''_{m_i, n_i}(t)]$ полумарковская матрица, имеющая те же самые размеры, что и матрица смежности;

$$r''_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix};$$

$$h''_i(t) = \begin{pmatrix} 0 & \pi_{1_i} \delta(t) & \dots & \pi_{m_i} \delta(t) & \dots & \pi_{M_i} \delta(t) \\ f_{1_i}(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ f_{m_i}(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ f_{M_i}(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix};$$

$$M_i = \begin{cases} S_i, & \text{when } i \in \{1, 2\}, \\ U_3, & \text{when } i = 3. \end{cases} \quad (22)$$

Вследствие того, что транзакции генерируются в результате блужданий по состояниям полумарковских процессов, транзакции, сгенерированные по каждой отдельной траектории, могут рассматриваться как отдельный поток, а генерация по множеству возможных траекторий может рассматриваться как объединение потоков транзакций. В соответствии с теоремой Б. Грителиониса [9], подтвержденной для данного конкретного случая моделированием с использования метода Монте-Карло [10], подобный суммарный поток является пуассоновским. Следовательно, можно ввести ограничение на плотности распределения времени между транзакциями, и считать, что процесс является строго марковским с непрерывным временем, а указанные плотности описываются следующим образом:

$$\hat{f}_{m_i}(t) = \lambda_{m_i} \exp(-\lambda_{m_i} t), \quad (23)$$

где $\lambda_{m_i} = \frac{1}{T_{m_i}}$ - плотность потока транзакций.

4. Модели взаимодействия как «соревнования» двух и трех субъектов. Вернемся к сети Петри-Маркова, приведенной на рис. 1 б. Взаимодействие на переходах $\zeta_{11}, \zeta_{21}, \zeta_{31}$ осуществляется следующим образом. Выполнение полушагов $[\alpha_1, \zeta_{11}]$, $[\alpha_2, \zeta_{21}]$ и $[\alpha_3, \zeta_{31}]$ означает, что полумарковские процессы (21) после естественного завершения пребывания в состояниях a''_{m_i} вернулись в состояние a''_{0_i} , и далее произошли их переключения в состояния $a''_{1_i}, \dots, a''_{m_i}, \dots, a''_{S_i}$ с вероятностями $\pi_{1_i}, \dots, \pi_{m_i}, \dots, \pi_{S_i}$, если $i \in \{1, 2\}$, и в состояния $a''_{1_3}, \dots, a''_{m_3}, \dots, a''_{U_3}$ с вероятностями $\pi_{1_i}, \dots, \pi_{m_i}, \dots, \pi_{U_i}$, если $i = 3$. Кроме того, переключение любого из процессов в состояние a''_{0_i} приводит к генерации транзакции в сопряженные полумарковский процесс. При поступлении транзакции из сопряженного полумарковского процесса происходит перезапуск процесса, на который поступила транзакция. Для моделирования перезапуска в структуры процессов вводятся дополнительные состояния: a''_{S_i+1} , если $i \in \{1, 2\}$, или a''_{U_3+1} и a''_{U_3+2} , если $i = 3$. Переключение из введенных состояний в состояния $a''_{1_i}, \dots, a''_{m_i}, \dots, a''_{S_i}$ производится в течение времени, определяемого вырожденным законом распределения с вероятностями $q_{1_i}, \dots, q_{m_i}, \dots, q_{S_i}$, если $i \in \{1, 2\}$, и в состояния $a''_{1_3}, \dots, a''_{m_3}, \dots, a''_{U_3}$ с вероятностями $q_{1_i,1}, \dots, q_{m_i,1}, \dots, q_{U_i,1}$, если $i = 3$, и поступила транзакция из

процесса α_1''' , и с вероятностями $q_{1_i,2}, \dots, q_{m_i,2}, \dots, q_{U_i,2}$, если поступила транзакция из процесса α_2''' (рис. 2 а, б, штриховые и штрихпунктирные линии, соответственно).

Таким образом, в каждом из состояний процессов α_i''' , $i \in \{1,2\}$ развивается «соревнование» [11, 12] двух субъектов, между естественным переключением и переключением через прерывание. В каждом из состояний процессов α_3''' , развивается «соревнование» трех субъектов, между естественным переключением и переключением через прерывания одного из двух типов.

«Соревнование» двух и трех субъектов описываются сетями Петри-Маркова, приведенными на рис. 3, а и б соответственно.

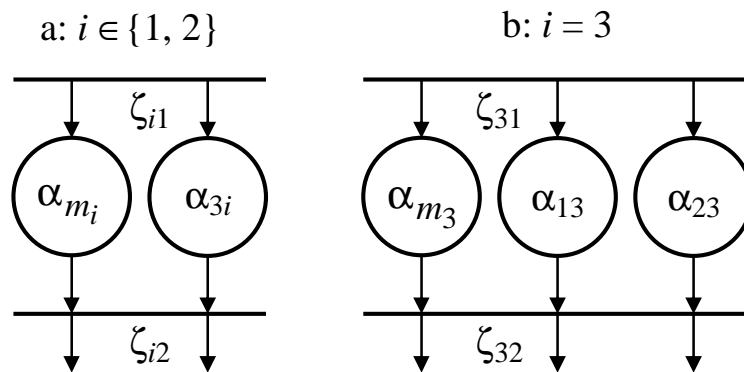


Рис. 3. Полумарковские процессы, описывающие «соревнования» двух (а) и трех (б) субъектов

Сеть Петри-Маркова, описывающая «соревнование» двух субъектов, включает состояния α_{m_i} и α_{3i} , а также переходы $\bar{\zeta}_{i1}$ и $\bar{\zeta}_{i2}$ $i \in \{1, 2\}$. Позиции α_{m_i} представляют собой модели состояний a_{m_i}'' марковского процесса. Позиции α_{3i} , α_{32} представляют собой модели поступающих транзакций. Выполнение полушагов $(\bar{\zeta}_{i1}, \alpha_{m_i})$ и $(\bar{\zeta}_{i1}, \alpha_{3i})$ происходит одновременно. «Победителем» «соревнования» является позиция, из которой будет раньше сделан полушаг, $(\alpha_{m_i}, \bar{\zeta}_{i2})$ или $(\alpha_{3i}, \bar{\zeta}_{i2})$. Сеть Петри-Маркова, описывающая «соревнование» трех субъектов, включает позиции α_{m_3} , α_{13} и α_{23} , а также переходы $\bar{\zeta}_{31}$ и $\bar{\zeta}_{32}$ i . Позиции α_{m_3} представляют собой модели состояний a_{m_3}'' марковского процесса. Позиции α_{13} , α_{23} представляют собой модели поступающих транзакций. Выполнение полушагов $(\bar{\zeta}_{31}, \alpha_{m_3})$, $(\bar{\zeta}_{31}, \alpha_{13})$ и $(\bar{\zeta}_{31}, \alpha_{23})$ происходит одновременно. «Победителем» «соревнования» является позиция, из которой будет раньше сделан полушаг, $(\alpha_{m_3}, \bar{\zeta}_{32})$, $(\alpha_{13}, \bar{\zeta}_{32})$ или $(\alpha_{23}, \bar{\zeta}_{32})$.

Обозначим плотность потока транзакций из α_3 в α_1 как λ_{31} и из α_3 в α_2 как λ_{32} . Тогда плотность распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в $\bar{\zeta}_{i2}$, определяется по зависимости

$$f_{\zeta_2}(t) = \lambda_{m_i} \exp[-t(\lambda_{m_i} + \lambda_{3i})] + \lambda_{3i} \exp[-t(\lambda_{m_i} + \lambda_{3i})], i \in \{1, 2\}. \quad (24)$$

Взвешенные условные плотности распределения того времени что первыми будут сделаны полушаги $(\alpha_{m_i}, \bar{\zeta}_{i2})$ и $(\alpha_{31}, \bar{\zeta}_{i2})$ равны

$$\left[\frac{\bar{h}_{m_i, S_i+1}''''(t)}{\bar{h}_{m_i, 0_i}''''(t)} \right] = \left(\frac{\frac{\lambda_{3i}}{\lambda_{3i} + \lambda_{m_i}} \exp[-t(\lambda_{m_i} + \lambda_{3i})]}{\frac{\lambda_{m_i}}{\lambda_{3i} + \lambda_{m_i}} \exp[-t(\lambda_{m_i} + \lambda_{3i})]} \right), i \in \{1, 2\}. \quad (25)$$

Обозначим плотность потока транзакций из α_1 в α_3 как λ_{13} , из α_2 в α_3 как λ_{23} . Тогда плотность распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в $\bar{\zeta}_{i2}$, определяется по зависимости

$$f_{\zeta_2}(t) = \lambda_{13} \exp[-t(\lambda_{m_3} + \lambda_{13} + \lambda_{23})] + \lambda_{23} \exp[-t(\lambda_{m_3} + \lambda_{13} + \lambda_{23})] + \lambda_{m_3} \exp[-t(\lambda_{m_3} + \lambda_{13} + \lambda_{23})]. \quad (26)$$

Вероятности того, что первыми будут сделаны полушаги $(\alpha_{m_3}, \bar{\zeta}_{32})$, и $(\alpha_{13}, \bar{\zeta}_{32})$, $(\alpha_{23}, \bar{\zeta}_{32})$ равны:

$$\left[\frac{\bar{h}_{m_3, S_3+1}''''(t)}{\bar{h}_{m_3, S_3+2}''''(t)} \right] = \left(\frac{\frac{\lambda_{13}}{\lambda_{13} + \lambda_{23} + \lambda_{m_3}} \exp[-t(\lambda_{m_3} + \lambda_{13} + \lambda_{23})]}{\frac{\lambda_{23}}{\lambda_{13} + \lambda_{23} + \lambda_{m_3}} \exp[-t(\lambda_{m_3} + \lambda_{13} + \lambda_{23})]} \right). \quad (27)$$

Параметры (25) и (27) представляют собой параметры полумарковского процесса, структура которого показана на рис. 2 штриховыми и штрихпунктирными линиями. Процесс имеет вид

$$\bar{\alpha}_i'''' = \{\bar{A}_i'''', \bar{\mathbf{r}}_i'''', \bar{\mathbf{h}}_i''''(t)\}, i \in \{1, 2, 3\}, \quad (28)$$

где $\bar{A}_i'''' = \{a_{0_i}'''', a_{1_i}'', \dots, a_{m_i}'', \dots, a_{S_i}''', a_{S_i}'''\}$, если $i \in \{1, 2\}$, и $\bar{A}_3'''' = \{a_{0_3}''', a_{1_3}'', \dots, a_{m_3}'', \dots, a_{U_3}''', a_{U_3+1}'', a_{U_3+2}'''\}$, если $i = 3$; $\bar{\mathbf{r}}_i'''' = (r_{m_i, n_i})$ - матрица смежности, имеющая размеры $(S_i + 1) \times (S_i + 1)$, если $i \in \{1, 2\}$ и $(U_3 + 2) \times (U_3 + 2)$, если $i = 3$; $\bar{\mathbf{h}}_i''''(t) = [\bar{h}_{m_i, n_i}''''(t)]$ полумарковская матрица, имеющая те же самые размеры, что и матрица смежности;

$$\overline{\mathbf{r}}_i''' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \\ & & \dots & & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \\ & & \dots & & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}, i \in \{1, 2\}; \quad (28)$$

$$\overline{\mathbf{h}}_i'''(t) = \begin{pmatrix} 0 & \pi_{1_i} \delta(t) & \dots & \pi_{m_i} \delta(t) & \dots & \pi_{S_i} \delta(t) & 0 \\ \overline{h}_{i,0_i}'''(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{i,0_i}'''(t) \\ & & \dots & & & & \\ \overline{h}_{m_i,0_i}'''(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{m_i,S_i+1}'''(t) \\ & & \dots & & & & \\ \overline{h}_{S_i,0_i}'''(t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{m_i,S_i+1}'''(t) \\ 0 & q_{1_i} \delta(t) & \dots & q_{m_i} \delta(t) & \dots & q_{S_i} \delta(t) & 0 \end{pmatrix}, \quad (29)$$

$i \in \{1, 2\};$

$$\overline{\mathbf{r}}_3''' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 \\ & & \dots & & & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 \\ & & \dots & & & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, i=3; \quad (30)$$

$$\overline{\mathbf{r}}_3''' = \begin{pmatrix} 0 & \pi_{1_i} \delta(t) & \dots & \pi_{m_i} \delta(t) & \dots & \pi_{U_i} \delta(t) & 0 & 0 \\ \overline{h}_{3,0_3}''' & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{3,U_3+1}''' & \overline{h}_{3,U_3+2}''' \\ & & \dots & & & & & \\ \overline{h}_{m_3,0_3}''' & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{m_3,U_3+1}''' & \overline{h}_{m_3,U_3+2}''' \\ & & \dots & & & & & \\ \overline{h}_{U_3,0_3}''' & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \overline{h}_{U_3,U_3+1}''' & \overline{h}_{U_3,U_3+1}''' \\ 0 & q_{1_3,1} \delta(t) & \dots & q_{m_3,1} \delta(t) & \dots & q_{U_3,1} \delta(t) & 0 & 0 \\ 0 & q_{1_3,2} \delta(t) & \dots & q_{m_i,2} \delta(t) & \dots & q_{U_3,1} \delta(t) & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (31)$$

$i=3.$

Обозначим вероятности и плотности распределения, получаемые при предварительной оценке как ${}^0\pi_{m_i} = \pi_{m_i}$, ${}^0\overline{\mathbf{h}}_i^m(t) = \overline{\mathbf{h}}_i^m(t)$, а на l -м шаге оценки как ${}^l\pi_{m_i}$, ${}^l\overline{\mathbf{h}}_i^m(t)$. Тогда значения параметры потоков транзакций могут быть получены с помощью следующей итерационной процедуры.

1. Рассчитываются параметры ${}^0\pi_{m_i}$, ${}^0\overline{\mathbf{h}}_{m_i}^m(t)$.
2. Производится пересчет параметров ${}^{l+1}\pi_{m_i} = \varphi_\pi[{}^l\pi_{m_i}, {}^l\overline{\mathbf{h}}_i^m(t)]$, ${}^{l+1}\overline{\mathbf{h}}_i^m(t) = \varphi_h[{}^l\pi_{m_i}, {}^l\overline{\mathbf{h}}_i^m(t)]$, где φ_π и φ_h - функции, определяемые полученными выше зависимостями и метода последовательных упрощений полумарковских процессов.
3. Процедура повторяется до тех пор, пока изменение параметров на очередном шаге итерации не превысит определенного процента от номинального значения.

5. Заключение. Таким образом, построена аналитическая модель генерации команд управления мобильным роботом в диалоговом режиме с управляющей ЭВМ, при условии, что управление бортовым оборудованием робота также производится бортовой ЭВМ. Работа оператора за пультом разделена на элементарные действия, для каждого из которых достаточно просто измерить временные характеристики и оценить вероятности перехода к другому действию. Работа ЭВМ и бортового оборудования осуществляется по циклограмме, которая разделяется на элементарный действия, для каждого из которых просто определить временной интервал выполнения, а также вероятность перехода к одному из следующих возможных действий. Это дает возможность настройки системы управления мобильного робота на решения конкретных задач с конкретными условиями их выполнения, определяемыми окружающей средой. Полученный результат может быть использован при проектировании интерактивных алгоритмов взаимодействия в сложных эргатических системах.

Дальнейшее продолжение исследований может быть направлено на совершенствование итерационной процедуры, построение модифицируемых циклограмм, позволяющих управлять потоками транзакций в диалоговых системах.

Список литературы

1. Kahar S., Sulaiman R., Prbuwono A.S., Ahmad N.A., Abu Hassan M.A. A review of wireless technology usage for mobile robot controller, 2012 International conference on system engineering and modeling (ICSEM 2012). Vol. 34. P. 7 - 12.

2. Ivutin A., Larkin E., Kotov V. Established routine of swarm monitoring systems functioning // *Advances in Swarm and Computational Intelligence*. Springer Science + Business Media, 2015. P. 415–422.
3. Tzafestas S.G. *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, 2014.
4. Ivutin A.N., Larkin E.V., Lutskov Y.I., Novikov A.S. Simulation of concurrent process with Petri-Markov nets // *Life Science Journal*, 2014. Vol. 11. N. 11. P. 506–511.
5. Larkin E.V., Ivutin A.N. Estimation of Latency in Embedded Real-Time Systems // *3-rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO-2014)*. 2014 June 15-19. Budva, Montenegro, 2014. P. 236 - 239.
6. Li Y.T., Malik S., Wolf A. Efficient microarchitecture modeling and path analysis for real time software. *Proceedings of 16-th Real time systems symposium*. IEEE, 2016 P. 298 - 307.
7. Korolyuk V., Swishchuk A. *Semi-Markov random evolutions* // *Semi-Markov Random Evolutions*. Springer Science + Business Media, 1995. P. 59–91.
8. Larkin E.V., Ivutin A.N., Kotov V.V., Privalov A.N. Semi-Markov modeling of commands execution by mobile robot. *Proceedings of first International conference @Interactive collaborated robotics ICR 2016*. Lecture notes in artificial intelligence. Springer, 2016. P. 189 - 198.
9. Grigelionis B. On the convergence of sums of random step processes to a Poisson process. *Theory Probab. Appl*, 1963. P. 177 - 182.
10. Larkin E.V., Ivutin A.N., Kotov V.V., Privalov A.N. Semi-Markov modeling of commands execution by mobile robot. *Proceedings of first International conference @Interactive collaborated robotics ICR 2016*. Lecture notes in artificial intelligence. Springer 2016. P. 189 - 198.
11. Cleaveland R., Smolka S.A. Strategic directions in concurrency research // *CSUR*. 1996. Dec. Vol. 28. N. 4. P. 607 - 625.
12. Ivutin A.N., Larkin E.V. Simulation of Concurrent Games // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. Chelyabinsk, 2015. Vol. 8. № 2. P. 43 - 54.

Ларкин Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, elarkin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELING OF DIALOGUE REGIMES OF DISTANCE ROBOT CONTROL

E.V. Larkin

Process of remote control of mobile robots is investigated. Petri-Markov net for modeling of dialogue regime is worked out. It is shown, that sequence of operations both human operator and dialogue computer and onboard computer may be simulated by semi-Markov process. From common model of algorithms of generation of transactions semi-Markov process, which includes states, which generate transactions only is obtained. Semi-Markov process is transformed into markov process, which describes generation of transac-

tion flow. It is shown, that real transaction flow is result of «concurrency» in states of Markov process. Iteration procedure for evaluation of parameters of flow of transactions, which takes into account effect of «concurrency» is proposed.

Key words: mobile robot, dialogue, onboard computer, human operator, semi-Markov process, Petri-Markov net, flow of transactions, «concurrency».

Larkin Eugene Vasilyevich, doctor of technical science, professor, head of chair, elarkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.5.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ОТСЕЧНОГО КЛАПАНА С АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

В.А. Мозжечков, О.О. Кот

Предложены модель и метод синтеза закона управления электроприводом с двигателем постоянного тока, который посредством кривошипно-шатунного механизма закрывает отсечной клапан. Электропитание привода осуществляется от автономной батареи суперконденсаторов. Закон управления обеспечивает закрывание клапана за заданное время с минимальным расходом энергии и безударной остановкой. Учтены ограничения на ток и напряжение питания, а также непостоянство напряжения питания и давления рабочей среды в клапане.

Ключевые слова: электропривод, трубопроводная арматура, клапан, отсечной клапан, закон управления, расход энергии, безударная остановка.

Электроприводы трубопроводной арматуры [1 - 11] являются одним из наиболее массовых типов электроприводов. Их назначение — управление положением запирающего или регулирующего элемента трубопроводной арматуры, разновидностями которой являются задвижки, клапаны, краны, затворы и т.п. [11].

Трубопроводная арматура, предназначенная для быстрого автоматического закрывания трубопровода, с целью защиты связанного с ним оборудования, недопущения или минимизации последствий аварий называется защитной арматурой [1, 3, 10]. Среди защитной арматуры особый класс составляет отсечная арматура. В отличие от прочей защитной арматуры, она приводится в действие не энергией среды, протекающей в трубопроводе, а энергией внешнего источника, по сигналу от внешнего устройства. Как правило, отсечная арматура - это быстродействующие запорные клапаны с электро-, пневмо- или механическим пружинным приводом.