

The technique of obtaining a simulation of mathematical model based on the energy subsystem autonomous mobile robot of the theory of mass service, using the Erlang equations.

Key words: autonomous mobile robot, queuing system, power supply system, Erlang equations, energy supply.

Zubrilin Aleksey Vasilyevich, student, draconis-crimson@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University.

УДК 519.217.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТРЕНАЖЕРА С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ-МАРКОВА

А.Н. Ивутин

Показана возможность создания сети Петри-Маркова, моделирующей работу аппаратно-программных средств тренажера моделью алгоритма управления движением. Реализованный в аппаратно-программной среде алгоритм представляет собой виртуальный объект, подобный реальному транспортному средству.

Ключевые слова: тренажерная система, алгоритм, полумарковский процесс, сеть Петри-Маркова

Проиллюстрируем возможность создания сети Петри-Маркова (СПМ), моделирующей работу аппаратно-программных средств тренажера моделью алгоритма управления движением, показанной на рис. 1. Алгоритм реализуется в программной среде ЭВМ, связь с обучаемым оператором осуществляется через оборудование макета рабочего места оператора. Реализованный в аппаратно-программной среде алгоритм представляет собой виртуальный объект, подобный реальному транспортному средству [1].

Позиции СПМ моделируют следующие состояния ЭВМ и ТС: $a_{1,1}$ - опрос состояния имитатора ключа зажигания; $a_{1,2}$ - если ключ зажигания повернут, опрос состояния имитатора ключа стартера; $a_{1,3}$ - если имитатор ключа стартера повернут, опрос состояния имитатора рычага передачи; $a_{1,4}$ - если имитатор рычага передачи находится на нейтральной передаче, то проверка угловой скорости виртуального двигателя; $a_{1,5}$ - если угловая скорости вращения вала виртуального двигателя нулевая, то начало интегрирования дифференциального уравнения стартера совместно с дифференциальным уравнением вала двигателя; $a_{1,6}$ - формирование признака ошибки действия оператора (попытка завести двигатель при включенной передаче); $a_{1,7}$ - формирование признака ошибки действия оператора (попытка завести вращающийся двигатель); $a_{1,8}$ - расчет приращения угловой скоро-

сти вала виртуального двигателя; $a_{1,9}$ - расчет угловой скорости вала виртуального двигателя; $a_{1,10}$ - формирование изображения тахометра на приборной доске; $a_{1,11}$ - анализ состояния имитатора педали газа; $a_{1,12}$ - если имитатор педали газа не в нулевом положении, то анализ угловой скорости вращения виртуального двигателя со стартером; $a_{1,13}$ - если угловой скорости вращения виртуального двигателя недостаточно, то формирование сигнала ошибки; $a_{1,14}$ - опрос состояния имитатора педали сцепления; $a_{1,15}$ - выбор модели, соответствующей выжатой педали сцепления; $a_{1,16}$ - выбор модели, соответствующей отпущенной педали сцепления; $a_{1,17}$ - при отпущенной педали сцепления определение взаимосвязанных значений угловых скоростей вращения вала двигателя и выходного вала коробки передач; $a_{1,18}$, $a_{1,19}$ - при нажатой педали сцепления раздельное определение угловых скоростей вращения вала двигателя и выходного вала коробки передач; $a_{1,20}$ - опрос состояния имитатора переключателя скоростей; $a_{1,21}$ - определение ситуации, совпадает ли состояние переключателя скоростей с предыдущим; $a_{1,22}$ - при несовпадении состояния переключателя дополнительная проверка имитатора сцепления; $a_{1,23}$ - при невыжатой педали сцепления фиксация ошибки оператора; $a_{1,24}$ - проверка условия, является ли состояние переключателя скоростей разрешенным; $a_{1,25}$ - если переключение не разрешено, то фиксация ошибки оператора; $a_{1,26}$ - настройка модели трансмиссии в соответствии с выбранной передачей; $a_{1,27}$ - по пространственному положению подвижного наземного объекта, угловой скорости вращения вала двигателя проверка соответствия выбранных параметров трансмиссии и подачи топлива оптимальным значениям, фиксация результатов проверки; $a_{1,28}$ - формирование текущего изображения тахометра на приборной доске подвижного наземного объекта (показания угловой скорости вращения вала двигателя); $a_{1,29}$ - по текущим оборотам двигателя формирование соответствующей шумовой картины; $a_{1,30}$ - определение приращения продольной скорости движения подвижного наземного объекта на траектории; $a_{1,31}$ - определение скорости и координат центра масс подвижного наземного объекта на траектории; $a_{1,32}$ - опрос положения имитатора руля; $a_{1,33}$ - расчет положения направляющих колес с учетом наличия гидроусилителя; $a_{1,34}$ - расчет приращения угла курса; $a_{1,35}$ - расчет текущего угла курса; $a_{1,36}$ - пересчет траекторных координат и угла курса в земные координаты центра масс; $a_{1,37}$ - по координатам центра масс и углу курса расчет координат точек касания колес подвижного наземного объекта поверхности Земли; $a_{1,38}$ - проверка условий учебно-тренировочной задачи по наличию препятствий на пути следования подвижного наземного объекта; $a_{1,39}$ - при попадании одного или нескольких колес на непреодолимое препятствие (яма, окоп и т.п.) определение ситуации, не выходит ли центр масс подвижного наземного объекта за площадь опоры; $a_{1,40}$ - при нарушении равновесия формирование признака аварийной ситуации; $a_{1,41}$ - пересчет габаритных координат подвижного наземного объекта; $a_{1,42}$ - при

совпадении габаритных координат с непреодолимым препятствием (столб, стена), определение, достаточна ли кинетическая энергия подвижного наземного объекта для разрушения препятствия; $a_{1,43}$ - определение высот точек касания колес подвижного наземного объекта поверхности Земли; $a_{1,44}$ - определение приращения вертикальной и двух угловых (тангаж, крен) координат виртуального объекта (поперечные колебания); $a_{1,45}$ - определение текущих вертикальной и двух угловых (тангаж, крен) координат виртуального объекта; $a_{1,46}$ - пересчет угловых координат (тангаж, крен, курс) в направляющие косинусы связанной системы координат в земной системы координат; $a_{1,47}$ - передача направляющих косинусов на сервер инструктора для формирования фоно-целевой обстановки; $a_{1,48}$ - расчет требуемого углового положения динамической платформы тренажера и выдача исходных данных для работы следящей системы платформы; $a_{1,49}$ - измерение сигналов обратной связи динамической платформы; $a_{1,50}$ - расчет управляющих воздействий на приводы динамической платформы тренажера.

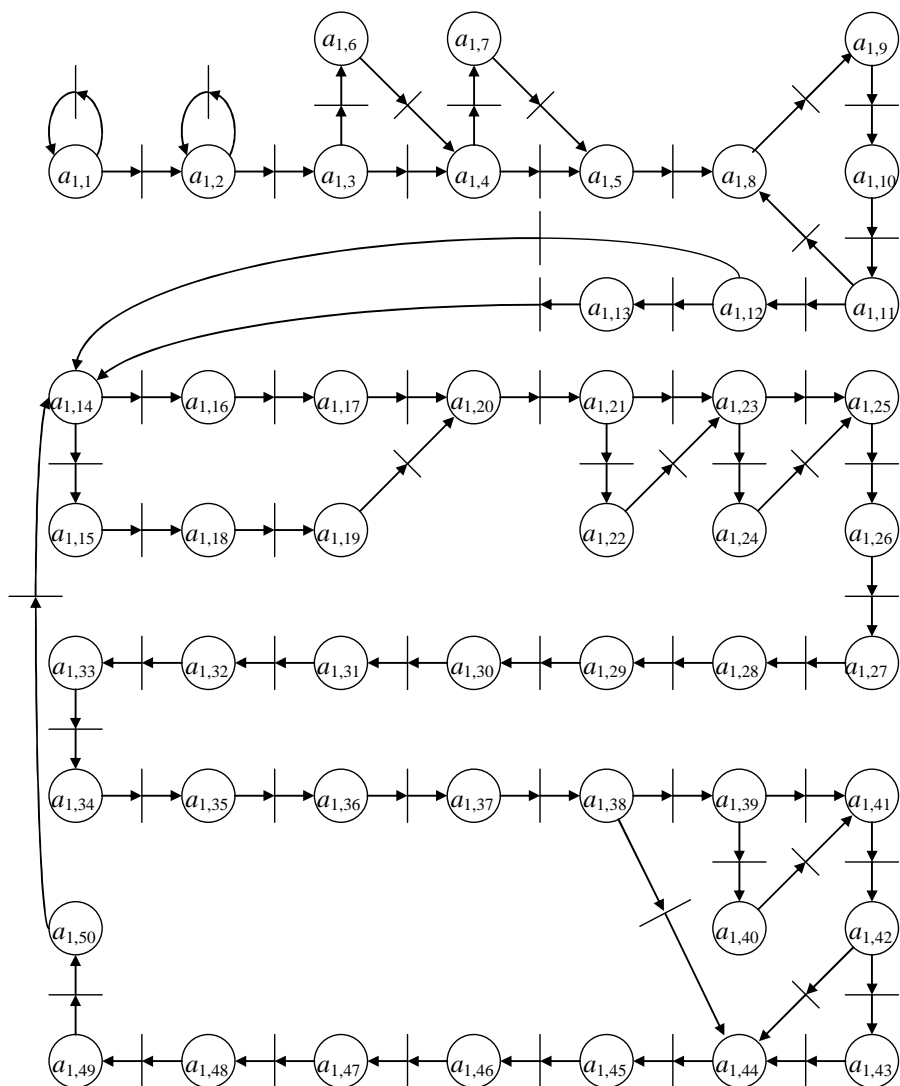


Рис. 1. СПМ программы управления движением

Рассмотрим действия оператора, находящегося за пультом управления эргатической системой, и получившего учебно-тренировочную задачу, сводящуюся к выбору одного из N органов управления (n -го) в ответ на загорание n -го из N транспарантов [2]. При ошибке выбора оператор повторяет попытку выбора до тех пор, пока нужный орган управления не будет найден. В данном случае в начале выполнения учебно-тренировочной задачи может быть построена модель действий оператора, которая может быть отнесена к разряду кольцевых моделей. СПМ, соответствующая указанной модели, имеет вид, приведенный на рис. 2.

Структура СПМ описывается следующей системой выражений:

$$\Pi = \{A, Z, \tilde{R}, \hat{R}\}; \quad (1)$$

$$A = \{a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n, a_{n+1}, \dots, a_N\}; \quad (2)$$

$$Z = \{z_0, z_1, \dots, z_{2n-2}, z_{2n-1}, z_{2n}, z_{2n+1}, z_{2n+2}, \dots, z_{2N-1}, z_{2N}\}; \quad (3)$$

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & & & \dots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & & & \dots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ n-1 \\ n \\ n+1 \\ \dots \\ N \end{matrix} \quad (4)$$

$$\hat{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \dots \\ 2n-3 \\ 2n-2 \\ 2n-1 \\ 2n \\ 2n+1 \\ 2n+2 \\ \dots \\ 2N-1 \\ 2N \end{matrix}; \quad (5)$$

Позиции СПМ имеют следующий физический смысл:

a_0 - восприятие и идентификация транспаранта, принятие решения о выборе органа управления;

$a_1, \dots, a_{n-1}, a_{n+1}, \dots, a_N$ - манипуляция выбранным органом управления,
 осознание того, что орган управления выбран неправильно;
 a_n - манипуляция верно выбранным органом управления.

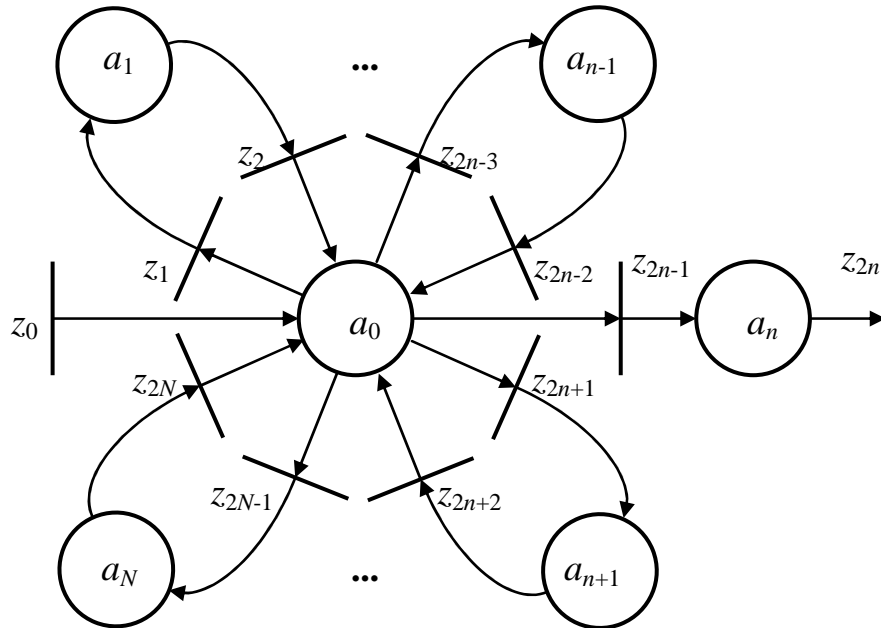


Рис. 2. СПМ, описывающая модель принятия решения

Переходы z_0 и z_{2n} моделируют начало и конец решения учебно-тренировочной задачи. Оставшиеся переходы являются примитивными.

Параметры СПМ описываются множеством

$$M = \{h(t), \Lambda\}; \quad (6)$$

$$h(t) = \begin{bmatrix} 0 & h_{01} & 0 & \dots & 0 & h_{0,2n+1} & 0 & h_{0,2n+1} & 0 & \dots & h_{0,2N-1} & 0 \\ 0 & 0 & h_{12} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{n+1,2n+2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h_{n,2n} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{n+1,2n+2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & h_{N,2N} \end{bmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ n-1 \\ n \\ n+1 \\ \dots \\ N \end{matrix} \quad (7)$$

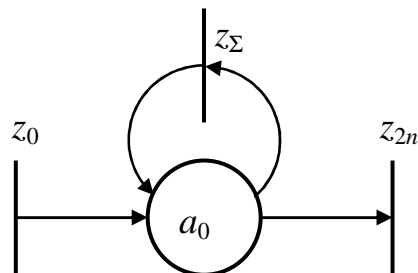


Рис. 3. Результат упрощений СПМ

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; \quad \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \dots \\ 2n-3 \\ 2n-2 \\ 2n-1 \\ 2n \\ 2n+1 \\ 2n+2 \\ \dots \\ 2N-1 \\ 2N \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 0 & 1 & \dots & n-1 & n & n+1 & \dots & N \end{matrix} \quad (8)$$

Возврат в a_0 может быть промоделирован единственной позицией, и СПМ (1) может быть упрощена (рис. 3).

В упрощенной СПМ:

$$\Pi = \{\{a_0\}, \{z_0, z_{2n}, z_\Sigma\}, \tilde{\mathbf{R}}, \mathbf{R}\}; \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2n & \Sigma \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 2n \\ \Sigma \end{matrix}. \quad (11)$$

Переходы z_0 и z_{2n} являются начальным и конечным, соответственно. Переход z_Σ является примитивным и характеризует цикличность когнитивного процесса [3].

Параметры СПМ описываются множеством

$$M = \{[0, h'_{0,2n}(t), h'_{0,\Sigma}(t)], \Lambda\}, \quad (12)$$

где

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 \\ 2n \\ \Sigma \end{matrix}; \quad (13)$$

$$h'_{0,2n}(t) = h_{0,2n-1}(t) * h_{n,2n}(t); \quad (14)$$

$$h'_{0,\Sigma}(t) = \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq n}}^N h_{0,2k-1}(t) * h_{k,2k}(t). \quad (15)$$

Из (14), (15) могут быть получены вероятности и плотности распределения времени пребывания фишки в позиции a_0 с соответствующими переключениями:

$$p'_{0,2n} = p_{0,2n-1}; \quad (16)$$

$$p'_{0,\Sigma} = 1 - p_{0,2n-1}; \quad (17)$$

$$f'_{0,2n}(t) = \frac{h'_{0,2n}(t)}{p_{0,2n-1}}; \quad (18)$$

$$f'_{0,\Sigma}(t) = \frac{h'_{0,\Sigma}(t)}{1 - p_{0,2n-1}}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) могут быть получены математические ожидания соответствующих плотностей распределения:

$$T'_{0,2n} = \int_0^{\infty} t f'_{0,2n}(t) dt; \quad D'_{0,2n} = \int_0^{\infty} (t - T'_{0,2n})^2 f'_{0,2n}(t) dt; \quad (20)$$

$$T'_{0,\Sigma} = \int_0^{\infty} t f'_{0,\Sigma}(t) dt; \quad T'_{0,\Sigma} = \int_0^{\infty} (t - T'_{0,\Sigma})^2 f'_{0,\Sigma}(t) dt. \quad (21)$$

Предположим, что с появлением навыка в решении учебно-тренировочной задачи выбора одного из N органов управления в ответ на загорание одного из N транспарантов вероятность $p'_{0,2n}$ повышается.

Среднее время, затрачиваемое на решение данной задачи, может быть определено по зависимости:

$$T_{\Sigma} = T'_{0,2n} + \frac{T'_{0,\Sigma}(1 - p_{0,2n-1})}{p_{0,2n-1}}. \quad (22)$$

Среднее время уменьшается, если вероятность $p_{0,2n-1}$ повышается (оператор делает меньше ошибок, следовательно, реже возвращается к исправлению ошибок и не тратит на это время).

Дисперсия времени решения учебно-тренировочной задачи, рассчитывается по формуле

$$D_{\Sigma} = D'_{0,2n} + \frac{D'_{0,\Sigma}(1 - p_{0,2n-1})}{p_{0,2n-1}} + \frac{T'^2_{0,\Sigma}(1 - p_{0,2n-1})}{p^2_{0,2n-1}}. \quad (23)$$

Дисперсия уменьшается, если $p_{0,2n-1}$ повышается (оператор меньше сомневается в своих решениях, его деятельность доведена до автоматизма).

Таким образом, по мере выработки у обучаемого оператора навыка в решении учебно-тренировочной задачи выбора когнитивная циклическая модель преобразуется все в большей степени в линейную, и когда вырабатываемый навык доводится до автоматизма, модель становится линейной.

Список литературы

1. Ларкин Е.В., Сабо Ю.И. Сети Петри-Маркова и отказоустойчи-

вость авионики. Тула: ТулГУ, 2004. 204 с.

2. Привалов А.Н., Курочкин С.А., Ларкин Е.В. Проектирование тренажеров подвижных наземных объектов: Концепция и методология проектирования - SaarbrückenDeutschland: LAPLAMBERTAcademicPublishingGmbH&Co., 2012. 257 Pp. ISBN 978-3-8465-2687-3

3. Ларкин Е.В. К вопросу о расчете временных характеристик сетей Петри-Маркова // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Автоматика. Управление. Т. 1. Вып. 1. Вычислительная техника. Тула: ТулГУ, 1997. С. 68 - 75.

Ивутин Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доц., alexey.ivutin@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELLING OFSIMULATOR'SHARDWARE ANDSOFTWAREBYPETRI-MARKOV NETS

A.N. Ivutin

The possibility of creating a Petri net-Markov modeling the performance of hardware and software simulator model of motion control algorithm is described. Show that implemented in hardware and software environment of the algorithm is a virtual object like a real vehicle.

Key words: simulator system, algorithm, semi-Markov process, Petri-Markov net

Ivutin Alexey Nicolaevich, candidate of technical science, docent, alexey.ivutin@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University