

ERGONOMICS OF THE FLEXIBLE SYSTEMS “MAN-COMPUTER”. USE OF SEMI-MARKOV PROCESS FOR THE TASK OF CHOICE OF MAN-OPERATOR

ЭРГОНОМИКА ГИБКИХ СИСТЕМ “ЧЕЛОВЕК-КОМПЬЮТЕР”. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУМАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Lavrov E.

Sumy State University (Ukraine)

Pasko N.

Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Abstract

Ergatic flexible systems with many active operators are research. The problem of choosing the optimal fixing of the human operator for an application for execution of the function is examined. The task used to support decision-making operator-manager. Objective function is a maximum of probability of faultless implementation. Set limit on the expected value of implementation time, on implementation of norms and limits on tension of operator activity.

Keywords: ergonomics, flexible system, “man-machine”, “man-computer”, algorithm of functioning, objective function, optimization model, man-operator

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы характеризуются созданием компьютерных систем нового типа. Развитие компьютерных сетей, Интернет и телекоммуникаций привело к тому, что над решением одного комплекса задач, проблем в одной фирме работает большое количество людей.

Причем, они могут быть территориально распределены и общаться между собой только посредством телекоммуникационного оборудования. Среди проблем, которые решаются таким образом задачи:

- слежения и управления сложными территориально распределенными техническими и технологически объектами;
- управления технологическими процессами гибких производственных систем;
- дистанционного обслуживания клиентов банка;

- управления процессами обслуживания заявок CALL-центров

- другие.

Особенностями таких систем являются:

- высокие требования к скорости и безошибочности обработки информации;
- наличие большого количества операторов, взаимодействующих между собой посредством телекоммуникационного оборудования и специального программного обеспечения;
- наличие операторов двух типов :
 - оператор – руководитель (распределяет заявки между операторами) и отслеживает процессы их выполнения посредством специальной информационной модели;
 - операторы-исполнители (манипуляторы); выполняют задания, порученные оператором руководителем.
- высокая напряженность деятельности операторов;

- различные возможности операторов по безошибочному и своевременному обслуживанию заявок;
- различная занятость операторов ;
- многовариантность решения задач закрепления заявок за операторами;
- случайное время возникновения заявок;
- ограниченное время на принятие решений о закреплении функций за операторами.

Для обеспечения требуемой эффективности таких систем необходима система поддержки принятия решений для оператора-руководителя [1].

Для решения оптимизационных задач выбора закрепления функций за оператором целесообразно воспользоваться моделями эрготехнических систем (ЭТС), развитыми научной школой проф. Губинского А.И. [2-6].

Такие модели позволяют создавать модели деятельности человека-оператора и решать различные оптимизационные задачи.

К сожалению, модели выбора для полиэргатических ЭТС (ПЭТС), к которым относятся исследуемые нами системы, разработаны недостаточно.

В связи с этим и возникла потребность разработки новой оптимизационной задачи для информационной системы оператора-руководителя систем “человек-компьютер”.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Анализ базовых моделей для оптимизации человека – машинных систем. В общем виде задача закрепления функций за операторами сформулирована в [1].

Оператору-руководителю ПЭТС поступает заявка на реализацию некоторой функции. Выполнением функции необходимо обеспечить получение некоторого результата, процесс достижения которого описывается алгоритмически. Существует множество операторов системы, которых можно назначать на этапы технологического процесса выполнения поступившей функции. Задана структура алгоритма выполнения заявки. Необходимо выбрать оператора, который обеспечивает максимум безошибочности выполнения алгоритма

при ограничении на среднее время выполнения алгоритма.

Оптимизация АФ ЭТС может проводиться на базе двух возможных типов моделей функционирования ЭТС: на графе работ (функциональной сети) на графе событий (с использованием полумарковских процессов (ПМП)) [2,3].

Первичной и более естественной формой представления АФ является граф работ. Для получения графа событий каждой вершине графа работ необходимо сопоставить события, соответствующие началу или окончанию выполнения соответствующей работы или операции. Исходов выполнения работ может быть несколько, в простейшем случае два: ошибочное выполнение и безошибочное выполнение. Каждому из исходов ставится в соответствие отдельная дуга на графе. Каждое из последующих состояний соответствует различным исходам выполнения АФ, в простейшем случае: правильное и неправильное. Пример перехода от графа работ к графу событий показан на рис.1 для алгоритмического процесса, который представляется типовой функциональной структурой (ТФС) «рабочая – контроль функционирования».

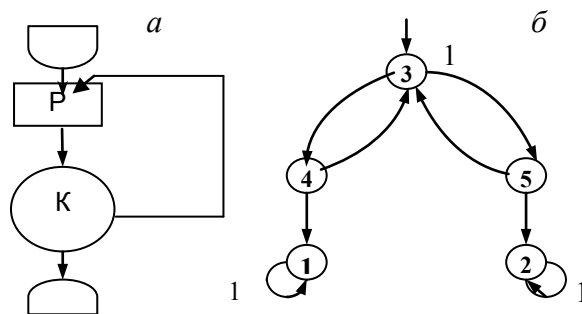


Рис.1. ТФС «Рабочая – контроль функционирования». Граф работ (а), граф событий (б).

В работе [4] предложены оптимизационные модели выбора варианта закрепления функций для алгоритмов функционирования последовательного типа на графе работ.

В работах [2,3,5,6] показано, что детерминированная оптимизационная задача для АФ ЭТС сводится к поиску оптимальной стратегии поглощающего ПМП по распределению конкретных способов выполнения операций, обеспечивающих увеличение ве-

роятности поглощения процесса в заданное поглощающее состояние r , соответствующее безошибочному исходу выполнения АФ, которая решается как задача частично-целочисленного программирования. Используем этот вывод при постановке и решении задачи оптимального закрепления функций за операторами.

2. Разработка математической модели выбора оператора. Обозначим через K множество всех операторов ПЭТС. Каждому варианту окончания функционирования процесса деятельности на графе событий ставим в соответствие свое поглощающее состояние, например, «безошибочное выполнение» процесса и его ошибочное выполнение. Поглощающие вершины нумеруем первыми r натуральными числами (r – количество поглощающих вершин). В их число входят интересующие нас положительные исходы r_l . Для начальных вершин, которые нумеруются числами из числовой последовательности после первых r поглощающих вершин, зададим вектор начальных вероятностей, т.е. вероятности нахождения системы в начальных состояниях в соответствующих вершинах графа событий:

$$a = (a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_n), \quad \text{при этом :} \quad \sum_{i=r+1}^N a_i = 1 \quad (1)$$

N – общее количество вершин, из которых первые r – поглощающие.

В каждой вершине i может быть K_i альтернатив или решений (работу могут выполнять $K_i \in K$ операторов). Каждому решению соответствует свой набор переходов, который характеризуется вероятностью перехода из вершины i в вершину j при выборе k -го решения, $k \in K_i$. В условиях задачи закрепления оператора за поступающими функциями k -е решение означает назначение оператора $k \in K_i \in K$ на этап технологического процесса, который моделируется вершиной i графа событий. $P_{ij}^{(k)}$ – вероятность перехода системы из вершины i в вершину j при выборе k -го решения. Причем:

$$\sum_j p_{ij}^{(k)} = 1 \quad \text{при всех } i \text{ и всех } k \in K_i \quad (2)$$

Вершины графа $l, m, \dots, n$ будем называть зависимыми, если в них должны приниматься одинаковые решения. В условиях задачи закрепления функций за операторами ПЭТС это означает, что некоторые операции алгоритма деятельности должны выполняться одним и тем же оператором.

Под оптимизацией системы понимается выбор в каждой вершине такого решения (альтернативы), чтобы целевой функции доставлялся экстремум. Целевая функция в данном случае – P_r – вероятность поглощения в r -состоянии (или в состояниях r -го типа).

Результатами оптимизации являются:

1. Значение целевой функции P_r ;
2. Номер решения в каждой вершине, доставляющий экстремум целевой функции.

При постановке задачи оптимизации в виде задачи линейного программирования целевая функция имеют вид:

$$P_r = \sum_l \sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} P_{il}^{(k)} * x_i^{(k)} \quad (3)$$

В формуле (3) $x_i^{(k)}$ – переменная, которая характеризует выбор решения: $x_i^{(k)} > 0$ в том случае, если в i -й вершине для выполнения работы выбрано k -е решение, и $x_i^{(k)} = 0$, в противном случае.

Для учета зависимых вершин вводим булевские переменные $\delta_i^{(k)}$ (для выполнения в вершине i операции k -м оператор) и добавляем ограничения, требующие, чтобы для зависимых состояний решения совпадали.

Тогда задача оптимизации выбора варианта закрепления операторов за поступающими функциями при условии, что операции выполняются одним и тем же оператором, будет иметь вид:

$$P_r = \sum_l \sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} P_{il}^{(k)} * x_i^{(k)} \rightarrow \max \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} x_j^{(k)} - \sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K} P_{ij}^{(k)} * x_i^{(k)} = a_j, \quad (5)$$

$$j=r+1, r+2, \dots, N$$

$$\sum_{k \in K_i} \delta_i^{(k)} = 1 \quad \text{при всех } i, \quad (6)$$

$$\delta_i^{(k)} = \delta_m^{(k)} = \dots = \delta_l^{(k)} \quad (7)$$

при всех $k \in K_i$

$$x_i^{(k)} - M * \delta_i^{(k)} \leq 0 \quad (8)$$

при всех i и всех $k \in K_i$

$$x_i^{(k)} - m * \delta_i^{(k)} \geq 0 \quad (9)$$

при всех i и всех $k \in K_i$

$$\sum_{j=1}^r \sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} P_{ij}^{(k)} * x_i^{(k)} = 1, \quad (10)$$

$$x_i^{(k)} \geq 0 \quad \text{при всех } i \text{ и всех } k \in K_i \quad (11)$$

Здесь m и M – достаточно малое и достаточно большое числа.

Смысл указанных ограничений следующий:

- 1) ограничение (6) для булевой переменной $\delta_i^{(k)}$ требует, чтобы для каждого i только одно $\delta_i^{(k)}$ было равно единице;
- 2) ограничение (7) требует, чтобы для зависимых состояний решения совпадали;
- 3) ограничение (8) требует, чтобы при каждом i не более чем одно $x_i^{(k)}$ было отлично от нуля (совместно с ограничением (11));
- 4) ограничение (9) требует, чтобы при каждом i одно или более $x_i^{(k)}$ было отлично от нуля. Совместно (8) и (9) требуют, чтобы лишь одно $x_i^{(k)}$ было отлично от нуля;
- 5) ограничение (10) является нормирующим условием, требующим, чтобы с вероятностью 1 процесс поглотился.

Решение данной задачи линейного программирования (4)-(11) обладает таким свойством, что для каждого i только один $x_i^{(k)}$ и один $\delta_i^{(k)}$ отличен от нуля. Это означает, что в вершине i для выполнения работы принимается k -е решение. Ограничение (7) обеспечивает принятие k -го решения в зависимых вершинах. Таким образом, мы находим оптимальное решение в каждой вершине, и, значит, оптимальную стратегию для системы. В условиях задачи закрепления поступающих функций за операторами системы это означает, что на этапы технологического процесса, моделируемые i -ми вершинами графа событий, назначается оператор $k \in K_i \in K$. Если необходимо, чтобы весь технологический процесс выполнял один оператор, то ограничение

(7) распространяется на все вершины графа.

3. Пример реализации. В качестве примера выбора оптимального варианта закрепления оператора за поступающими функциями рассмотрим случай, когда алгоритм деятельности оператора моделируется типовой функциональной структурой (ТФС) «рабочая – контроль функционирования без ограничения на допустимое число циклов контроля». Граф работ ТФС изображен на Рис. 1 (а), а граф событий – на Рис. 1(б). Поступающая функция закрепляется за одним из четырех операторов.

При переводе ТФС из структурной формы в вероятностный граф ПМП учитываем тот факт, что на непоглощающих вершинах необходимо принимать одинаковые альтернативы, т.е. имеем случай зависимых решений в вершинах графа 3, 4 и 5. Таким образом, необходимо решить задачу выбора оператора при наличии зависимых операций. Зададим матрицы переходных вероятностей при выполнении операций каждым из четырех операторов (Рис. 2).

Вектор начальных вероятностей: $a=(a_3, a_4, a_5)=(1, 0, 0)$.

Целевую функцию и систему ограничений получаем в соответствии с формулами (4)-(11).

Первый оператор, матрица [P _{ij} ⁽¹⁾]				
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0,91	0,09
0,92	0	0,08	0	0
0	0,05	0,95	0	0
Второй оператор, матрица [P _{ij} ⁽²⁾]				
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0,9	0,1
0,93	0	0,07	0	0
0	0,03	0,97	0	0
Третий оператор, матрица [P _{ij} ⁽³⁾]				
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0,99	0,01
0,98	0	0,02	0	0
0	0,06	0,94	0	0
Четвертый оператор, матрица [P _{ij} ⁽⁴⁾]				
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0,93	0,07
0,935	0	0,065	0	0
0	0,05	0,95	0	0

Рис. 2. Матрицы переходных вероятностей

Задача оптимизации выбора оператора:

$$P_1 = \sum_{i=3,4} \sum_{k=1}^4 P_{i1}^k * x_i^k \rightarrow \max$$

$$\sum_{k=1}^4 x_3^{(k)} - \sum_{i=4,5} \sum_{k=1}^4 x_i^{(k)} * P_{i3}^{(k)} = 1$$

$$\sum_{k=1}^4 x_4^{(k)} - \sum_{i=3,5} \sum_{k=1}^4 x_i^{(k)} * P_{i4}^{(k)} = 0$$

$$\sum_{k=1}^4 x_5^{(k)} - \sum_{i=3,4} \sum_{k=1}^4 x_i^{(k)} * P_{i5}^{(k)} = 0$$

$$\sum_{k=1}^4 (x_4^{(k)} * P_{41}^{(k)} + x_5^{(k)} * P_{52}^{(k)}) = 1$$

$$\sum_{k=1}^4 \delta_i^{(k)} = 1, \text{ при } i=3,4,5$$

$$\delta_3^{(k)} = \delta_4^{(k)} = \delta_5^{(k)}, \text{ при } k=1,2,3,4$$

$$x_i^{(k)} - M * \delta_i^{(k)} \leq 0, \quad x_i^{(k)} - m * \delta_i^{(k)} \geq 0$$

$$\text{при } i=3,4,5 \text{ и } k=1,2,3,4$$

$$x_i^{(k)} \geq 0, \quad \delta_i^{(k)} \in \{1, 0\}, \text{ при } k=1,2,3,4$$

Для решения составленной оптимизационной задачи используем средство «Поиск решения» табличного процессора MS Excel. Для этого на рабочем листе MS Excel устанавливаем целевую ячейку и заносим в эту ячейку формулу расчета целевой функции,

задаем ограничения на переменные и выполняем решение (рис. 3).

В результате, при заданных исходных данных (Рис. 2) и введенных ограничениях, получаем значение целевой функции и значения переменных: $P_1=0,995991$; $x_3^{(4)}=1,1454>0$; $x_4^{(4)}=1,0652>0$; $x_5^{(4)}=0,0802>0$. Полученные значения переменных означают, что максимум вероятности безошибочного выполнения алгоритма функционирования достигается при выполнении поступившей функции четвертым оператором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача проектирования полиэргатических систем направлена на устранение возможных негативных последствий от деятельности операторов и создание комфортных условий для людей (операторов-исполнителей и оператора-руководителя). Большое количество возможных вариантов не позволяет руководителю оценить оперативно последствия каждого из них. Поддержка принятия решений состоит в выборе оптимального (в постановке оператора-руководителя) варианта.

Предложенная оптимизационная модель выбора варианта закрепления функций для алгоритмов функционирования на графе событий позволяет оператору-руководителю в условиях информационной напряженности и дефицита времени оценить последствия распределения работ и выбрать оптимальный вариант.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
24	Переменные												
25	Имя переменной	X_3^1	X_3^2	X_3^3	X_3^4	X_4^1	X_4^2	X_4^3	X_4^4	X_5^1	X_5^2	X_5^3	X_5^4
26	Значение	0,0000	0,0000	0,0000	1,1454	0,0000	0,0000	0,0000	1,0652	0,0000	0,0000	0,0000	0,0802
27	Нижнее ограничение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	Целочисленные переменные												
29	Имя переменной	δ_3^1	δ_3^2	δ_3^3	δ_3^4	δ_4^1	δ_4^2	δ_4^3	δ_4^4	δ_5^1	δ_5^2	δ_5^3	δ_5^4
30	Значение	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
31	Верхнее ограничение	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	Целочисленное	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое	Целое
33		i=3	i=4	i=5									Направление
34	Вероятность нахождения системы в начальном состоянии в вершине i	1	0	0	Целевая функция:	$X_3^{(1)} \cdot P_{31}^{(1)} + X_3^{(2)} \cdot P_{31}^{(2)} + X_3^{(3)} \cdot P_{31}^{(3)} + X_3^{(4)} \cdot P_{31}^{(4)} + X_4^{(1)} \cdot P_{41}^{(1)} + X_4^{(2)} \cdot P_{41}^{(2)} + X_4^{(3)} \cdot P_{41}^{(3)} + X_4^{(4)} \cdot P_{41}^{(4)} + X_5^{(1)} \cdot P_{51}^{(1)} + X_5^{(2)} \cdot P_{51}^{(2)} + X_5^{(3)} \cdot P_{51}^{(3)} + X_5^{(4)} \cdot P_{51}^{(4)}$					0,995991	Максимум	
35													
36	Вид ограничения	Ограничения на $x_i^{(k)}$ и $P_i^{(k)}$									Левая часть	Знак	Правая часть
37	На переменные	$X_3^{(1)} + X_3^{(2)} + X_3^{(3)} + X_3^{(4)} + (X_4^{(1)} \cdot P_{43}^{(1)} + X_4^{(2)} \cdot P_{43}^{(2)} + X_4^{(3)} \cdot P_{43}^{(3)} + X_4^{(4)} \cdot P_{43}^{(4)} + X_5^{(1)} \cdot P_{53}^{(1)} + X_5^{(2)} \cdot P_{53}^{(2)} + X_5^{(3)} \cdot P_{53}^{(3)} + X_5^{(4)} \cdot P_{53}^{(4)}) = 1$									1,0000	=	1
38	На переменные	$X_4^{(1)} + X_4^{(2)} + X_4^{(3)} + X_4^{(4)} + (X_5^{(1)} \cdot P_{54}^{(1)} + X_5^{(2)} \cdot P_{54}^{(2)} + X_5^{(3)} \cdot P_{54}^{(3)} + X_5^{(4)} \cdot P_{54}^{(4)} + X_3^{(1)} \cdot P_{34}^{(1)} + X_3^{(2)} \cdot P_{34}^{(2)} + X_3^{(3)} \cdot P_{34}^{(3)} + X_3^{(4)} \cdot P_{34}^{(4)}) = 0$									0,0000	=	0
39	На переменные	$X_5^{(1)} + X_5^{(2)} + X_5^{(3)} + X_5^{(4)} + (X_3^{(1)} \cdot P_{35}^{(1)} + X_3^{(2)} \cdot P_{35}^{(2)} + X_3^{(3)} \cdot P_{35}^{(3)} + X_3^{(4)} \cdot P_{35}^{(4)} + X_4^{(1)} \cdot P_{45}^{(1)} + X_4^{(2)} \cdot P_{45}^{(2)} + X_4^{(3)} \cdot P_{45}^{(3)} + X_4^{(4)} \cdot P_{45}^{(4)}) = 0$									0,0000	=	0
40	На переменные	$X_4^{(1)} \cdot P_{41}^{(1)} + X_4^{(2)} \cdot P_{41}^{(2)} + X_4^{(3)} \cdot P_{41}^{(3)} + X_4^{(4)} \cdot P_{41}^{(4)} + X_5^{(1)} \cdot P_{52}^{(1)} + X_5^{(2)} \cdot P_{52}^{(2)} + X_5^{(3)} \cdot P_{52}^{(3)} + X_5^{(4)} \cdot P_{52}^{(4)} = 1$									1,0000	=	1
41	Ограничения на целочисленные переменные												
42	$\sum_{k \in K_i} \delta_i^{(k)} = 1$	$\delta_3^{(1)} + \delta_3^{(2)} + \delta_3^{(3)} + \delta_3^{(4)} = 1$									1	=	1
43		$\delta_4^{(1)} + \delta_4^{(2)} + \delta_4^{(3)} + \delta_4^{(4)} = 1$									1	=	1
44		$\delta_5^{(1)} + \delta_5^{(2)} + \delta_5^{(3)} + \delta_5^{(4)} = 1$									1	=	1
45	$\delta_n^{(k)} = \delta_m^{(k)} = \dots = \delta_l^{(k)}$	$\delta_4^{(1)} = \delta_5^{(1)}$	$\delta_3^{(1)} = \delta_5^{(1)}$	$\delta_4^{(2)} = \delta_5^{(2)}$	$\delta_3^{(2)} = \delta_5^{(2)}$	$\delta_4^{(3)} = \delta_5^{(3)}$	$\delta_3^{(3)} = \delta_5^{(3)}$	$\delta_4^{(4)} = \delta_5^{(4)}$	$\delta_3^{(4)} = \delta_5^{(4)}$				
46	Ограничения на вещественные и целочисленные переменные												
47	$x_i^{(k)} - M \cdot \delta_i^{(k)} \leq 0$ $x_i^{(k)} - m \cdot \delta_i^{(k)} \geq 0$	$x_4^{(k)} \cdot M \cdot \delta_4^{(k)} \leq 0, x_4^{(k)} \cdot m \cdot \delta_4^{(k)} \geq 0; x_5^{(k)} \cdot M \cdot \delta_5^{(k)} \leq 0, x_5^{(k)} \cdot m \cdot \delta_5^{(k)} \geq 0; x_3^{(k)} \cdot M \cdot \delta_3^{(k)} \leq 0, x_3^{(k)} \cdot m \cdot \delta_3^{(k)} \geq 0;$											
48		M=	1000	0,000000	≤	0	0,000000	≤	0	0,000000	≤	0	
49		m=	0,001	0,000000	≥	0	0,000000	≥	0	0,000000	≥	0	
50				0,000000	≤	0	0,000000	≤	0	0,000000	≤	0	
И $\blacktriangleleft \blacktriangleright \blacktriangledown \blacktriangleup$ Лист1 / Лист2 / Лист3 /													

Рис. 4. Применение средства «Поиск решения» для решения оптимизационной задачи

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е.А.Лавров, Н.Б.Пасько Подход к поддержке принятия решений о распределении функций между операторами АСУ// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер. Системы управления. - Харків, 2008 - 2/2 (32) - 2008. - С. 63-67
- [2] Информационно - управляющие человеко - машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник/ Адаменко А.Н., Ашероу А.Т., Лавров Е.А. и др.. под общ. ред. Губинского А.И. и Евграфова Е.Г.- М., Машиностроение, 1993. – 528с.
- [3] Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний (основы расчета функциональных и надежностных характеристик стохастических систем). – М.: Сов. Радио, 1980. – 271 с.
- [4] Е.А. Лавров, Н.Б. Пасько Выбор варианта групповой деятельности в эрготехнических системах с алгоритмами последовательного типа// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер. Информационные технологии. - Харьков, 2010 – 4/7(46) 2010. С. 50-55.
- [5] Губинский А.И., Чабаненко П.П., Лаушкин Г.Д. Оптимизация эрготехнических систем. – Киев: Знание УССР, 1982. – 24с.
- [6] Яковлев Б.А. Оптимизация полумарковского процесса решения при ограничениях и зависимых состояниях// Методы проектирования ИВК/Труды ВИИ электроизмерительных приборов. –Л.:1981. –С.31-34.

