4. Ларкин Е.В., Котов В.В., Котова Н.А., Соколов В.А. К вопросу о моделировании отказоустойчивых систем с помощью сетей Петри-Маркова // Фундаментальные исследования. №5, 2007. С. 74-78

Котов Владислав Викторович, д-р техн. наук, проф., vkotov@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Котова Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент, nkotova@inbox.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

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

PETRI-MARKOV MODEL GENERATION FOR COGNITIVE LEARNING TECHNOLOGY OPTIMIZATION

E.V. Larkin, V.V. Kotov, N.A. Kotova

Questions of using Petri-Markov networks for the task of human operator training are considered. The developed program for Petri-Markov network creation and editing is described. The format of storage of structure and network parameters is offered.

Key words: Petri-Markov network, simulator, cognitive learning technology

Kotov Vladislav Viktorovich, doctor of technical science, professor, vkotov@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kotova Natalia Aleksandrovna, candidate of technical science, docent, nkotova@inbox.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Larkin Evgeny Vasilievich, doctor of technical science, professor, manager of department, elarkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 519.217.2

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ ПЕТРИ-МАРКОВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.В. Ларкин, А.Н. Ивутин, Д.С. Костомаров

Построена аналитическая модель параллельного когнитивного процесса, в котором на структуру, учитывающую параллелизм, накладываются стохастико-временные параметры и логические условия взаимодействия процессов. Предложена методика формирования первичной структуры сети Петри-Маркова и определения ее вероятностных и временных характеристик.

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

Рассмотрим чисто исполнительскую функцию когнитивного процесса, приведение в действие выбранного органа управления, которым является, например, клавиша на пульте (рис. 1). Для нажатия клавиши оператор должен переместить руку из некоторой начальной позиции y_0 в позицию Y[1].

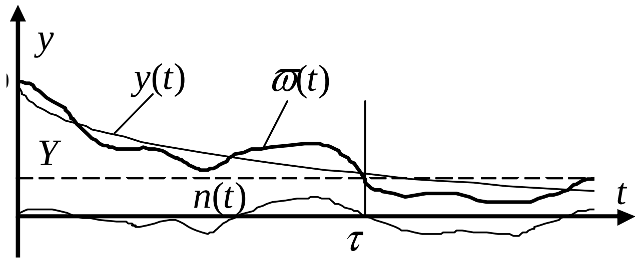

Рис. 1. Перемещение руки при манипуляции органом управления

На зависимость $y(t)$ накладываются случайные факторы, которые в первом приближении можно считать некоррелированным "белым шумом" $n(t)$ с плотностью распределения в каждом сечении, описываемой законом $\eta(y)$. Таким образом, процесс перемещения описывается зависимостью

$$\varpi(t) = y(t) + n(t). \qquad (1)$$

Нажатие клавиши происходит в случае, если величина $\varpi(t)$ в некоторый момент времени $t = \tau$ выходит за порог Y, т.е.

$$\varpi(\tau) = y(\tau) + n(\tau) \leq Y.$$

Вероятность указанного события определяется интегралом свертки, в котором $y(t)$ считается постоянной в рассматриваемом сечении величиной:

$$p[\varpi(\tau) \leq Y] = \int_{-\infty}^{Y}\int_{-\infty}^{\infty} \delta[y(\tau) - \zeta(\tau)]\eta[\zeta(\tau)]d\zeta(\tau)dy(\tau). \qquad (2)$$

В интеграле (2) $\zeta(\tau)$ представляет собой вспомогательную переменную для обозначения параметра $y(t)$.

Определим плотность распределения времени выхода координаты $\varpi(t)$ за порог Y.

Разобьем некоторый период времени t на интервалы Δ и построим СПМ, моделирующую исследуемый процесс (рис. 2).

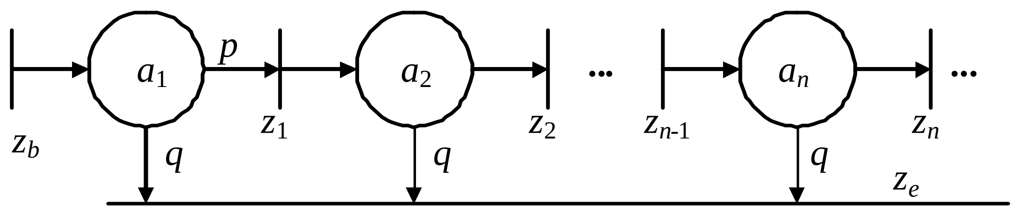

Рис. 2. СПМ, моделирующая процесс достижения порога Y

Сеть Петри, приведенная на рис. 2, в общем случае является бесконечной, т.е. содержит бесконечное множество позиций a_n и примитивных переходов z_n, n = 1, 2, ..., связывающих позиции в сеть:

$$\Pi = \{\{a_1, a_2, \ldots, a_n, \ldots\}, \{z_b, z_e, z_1, z_2, \ldots, z_n, \ldots\},$$

$$\{I_A(z_b) = \varnothing,\ I_A(z_e) = \{a_1, a_2, \ldots, a_n, \ldots\},\ I_A(z_1) = a_1, \ldots, I_A(z_n) = a_n, \ldots\}, \quad (3)$$
$$\{O_A(z_b) = a_1,\ O_A(z_e) = \varnothing,\ O_A(z_1) = a_2, \ldots, O_A(z_n) = a_{n+1}, \ldots\}\}.$$

Позиции и переходы сети имеют следующий физический смысл. Позиции a_n моделируют принятие системой решения о достижении или недостижении порога в течение времени Δ. Переход z_b является стартовым и моделирует начало движения руки. Переход z_e является конечным и моделирует достижение рукой требуемого рабочего органа. Достижение рабочего органа в течение времени Δпроисходит с вероятностью q, недостижение - с вероятностью $p = 1 - q$.

Пусть плотность распределения времени между некоторым моментом времени 0 и моментом достижения Δопределяется в виде $f(t)$. Тогда

$$q = \int_0^{\Delta} f(t)dt. \quad (4)$$

Вследствие малости Δ, плотность распределения за указанный промежуток времени меняется мало, поэтому можно считать, что $f(t) = \text{const} = f(0) = \lambda$, где λ - некоторый параметр. Поэтому $q = \lambda\Delta$, $p = 1 - \lambda\Delta$.

Как следует из структуры приведенной СПМ, вероятность того, что отказ произойдет в течение $(n + 1)$-го интервала времени t, определяется в виде

$$\pi_{n+1} = \lambda\Delta\,(1 - \lambda\Delta)^n. \quad (5)$$

Обозначим значение $n = t/\Delta$, и положим, что зависимость (5) представляет собой приращение искомой функции распределения на интервале Δ. Искомая плотность распределения получается в результате следующего предельного перехода:

$$f(t) = \lim_{\Delta \to 0}\left[\frac{\lambda\Delta(1-\lambda\Delta)^{t/\Delta}}{\Delta}\right] = \lim_{\Delta \to 0}\lambda(1-\lambda\Delta)^{t/\Delta}. \quad (6)$$

Введем вспомогательную переменную $\theta = \frac{1}{\lambda\Delta}$. Очевидно, что при $\Delta \to 0$, $\theta \to \infty$. Умножим обе части выражения на переменную t, получим

$$\frac{t}{\Delta} = t\lambda\theta. \quad (7)$$

Подставляя (1.140) в (1.139) будем иметь

$$f(t) = \lim_{\theta \to \infty}\lambda\frac{(\theta-1)^{t\lambda\theta}}{\theta} = \lim_{\theta \to \infty}\lambda\left[\left(1-\frac{1}{\theta}\right)^{\theta}\right]^{\lambda t} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

т.е. плотность распределения времени достижения обучаемым оператором рабочего органа с координатой Y определяется экспоненциальным законом распределения, где: λ - плотность потока исследуемых событий (достижений операторами рабочих органов).

Таким образом, при воздействии случайных факторов на движение руки оператора время достижения рабочего органа распределяется по экспоненциальному закону.

Рассмотрим ситуацию, когда $y(t) \neq \text{const}$. Разобьем весь временной промежуток $0 \ldots t$ на периоды Δ, в течение которых вероятности меняются мало, но возможно, являются разными, даже в соседних периодах. Указанная ситуация моделируется СПМ (3), но в которой $p_k \neq p_l$ (рис. 3).

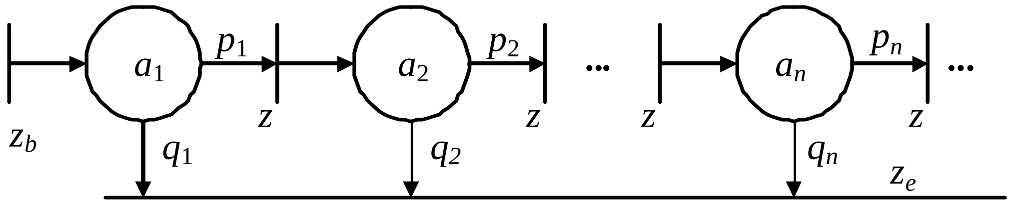

Рис. 3. СПМ, моделирующая достижение порога при y(t) ≠const

Периоды Δ могут быть подобраны таким образом, что параметры плотности распределения в течение этого периода меняются мало. В соответствии с вышерассмотренным случаем можно утверждать, что в этом случае в каждом из n периодов

$$f_n(t) = \lambda_n \exp(-\lambda_n t).$$

Вероятности того, что в СПМ, приведенной на рис. 3, будут сделаны полушаги из позиции a_n в переходы z_e и z_n равны, соответственно

$$q_n = \int_0^{\Delta} \lambda_n \exp(-\lambda_n t)dt = [1 - \exp(-\lambda_n \Delta)];$$

$$p_n = 1 - q_n = \exp(-\lambda_n \Delta).$$

Вероятность того, что полушаг в переход z_e будет сделан из $(n + 1)$-й позиции, определяются в виде

$$\pi_{n+1} = [1 - \exp(-\lambda_{n+1}\Delta]\prod_{k=1}^{n} \exp(-\lambda_k \Delta) = [1 - \exp(-\lambda_{n+1}\Delta]\exp\left[\sum_{k=1}^{n}(-\lambda_k \Delta)\right]. \quad (9)$$

Разложение функции $[1 - \exp(-\lambda_{n+1}\Delta]$ в ряд Маклорена в окрестностях точки $\Delta = 0$, дает

$$[1 - \exp(-\lambda_{n+1}\Delta] \approx \lambda_{n+1}\Delta. \quad (10)$$

Можно получить

$$\pi_{n+1} = \lambda_{n+1}\Delta \exp\left[\sum_{k=1}^{n}(-\lambda_k \Delta)\right]. \quad (11)$$

Но π_{n+1}, с учетом того, что значение плотности распределения на интервале Δ остается практически неизменным, определяется в виде

$$\pi_{n+1} = f[(n+1)\Delta]\Delta, \quad (12)$$

где $f[(n + 1)\Delta]$ - текущее значение искомой функции.

Подставляя (12) в (11), и учитывая, что

$$f[(n+1)\Delta] = f(t);$$

$$\lim_{\substack{\Delta\to 0\\ n\to\infty}} \lambda_{n+1} \exp\left[\sum_{j=1}^{n}(-\lambda_j \Delta)\right] = \lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right].$$

Таким образом, время достижения оператором рабочего органа определяется экспоненциальным законом, но с переменным параметром $\lambda(t)$ [2].

Одной из важных при практическом применении математического аппарата сетей Петри-Маркова является проблема формирования первичной модели. Аппарат сетей Петри-Маркова позволяет построить аналитическую модель параллельного когнитивного процесса, в котором на структуру, учитывающую параллелизм, накладываются стохастико-временные параметры и логические условия взаимодействия процессов. Одной из проблем, препятствующих применению аппарата сетей Петри-Маркова в практике моделирования когнитивных технологий, является отсутствие методики формирования первичной структуры сети и определения ее вероятностных и временных характеристик. Для формирования сети, описывающей параллельные взаимодействующие процессы, необходимо выполнение следующих действий.

Методика 1. Формирование СПМ

1) Определение состава взаимодействующих субъектов$S = \{s_{1(s)}, ..., s_{j(s)}, ..., s_{J(s)}\}$. При описании когнитивного процесса состав взаимодействующих субъектов определен: это - технические средства, управляющая ЭВМ, обучаемый оператор, инструктор. Кроме того, каждый субъект при моделировании может быть представлен в виде совокупности параллельных каналов, каждый из которых работает по своему алгоритму. Например, обучаемый оператор может быть представлен как субъект, получающий информацию по визуальному, звуковому, тактильному, вестбулярному, обонятельному каналам, аппаратные средства функционируют по командам ЭВМ параллельно, и т.п.

Все, что не входит в состав взаимодействующих субъектов, относится к окружающей среде C, которая может выборочно в определенные моменты времени воздействовать на любую из подсистем множества S.

2) Для подсистем$s_{j(s)}$, $1(s) \le j(s) \le J(s)$ составляются алгоритмы функционирования $\Pi_{j(s)}$, $1(s) \le j(s) \le J(s)$, включающие множество операторов $\{a_{1[a,j(s)]}, ..., a_{j[a,j(s)]}, ..., a_{J[a,j(s)]}\}$. Алгоритмы могут быть циклическими, а могут иметь операторы "Начало" и "Конец".

3) Для окружающей среды С на основании экспертных оценок составляется алгоритм Π_c воздействия на субъекты множества S.

4) Каждый из алгоритмов изображается в виде элементарной подсети Петри-Маркова (ЭППМ), включающей т.н. примитивные переходы, переходы начльный и конечный.; циклические алгоритмы содержат только примитивные переходы.

5) В каждой ЭППМ определяются примитивные переходы, которые в дальнейшем будут преобразованы в непримитивные. К таковым относятся:

переходы, следующие за позициями, моделирующими операторы $a_{j[a,j(s)]}$, генерирующие данные, используемые при выполнении операторов $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$;

переходы, следующие за позициями, моделирующими операторы $a_{j[a,j(s)]}$, выполнение которых необходимо для выполнения операторов $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$;

переходы, предшествующие позициям, моделирующим операторы $a_{j[a,j(s)]}$, использующие данные, генерируемые операторами $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$;

переходы, предшествующие позициям, моделирующим операторы $a_{j[a,j(s)]}$, для выполнения которых необходимо выполнение операторов $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$;

переходы, предшествующие позициям $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$, использующим данные, генерируемые операторами $a_{j[a,j(s)]}$;

переходы, предшествующие позициям $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$, для выполнения которых требуется, выполнение оператора $a_{j[a,j(s)]}$;

переходы, следующие за позициями, моделирующими операторы $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$, генерирующие данные, используемые оператором $a_{j[a,j(s)]}$;

переходы, следующие за позициями, моделирующими операторы $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$, выполнение которых требуется для выполнения оператора $a_{j[a,j(s)]}$;

переходы, которые в модели алгоритма $A_{j(s)}$ являются конечными, а в моделях алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$ - стартовыми;

переходы, которые в моделях алгоритмов $A_{k(s)}, ..., A_{l(s)}, ..., A_{m(s)}$ являются конечными, а в модели алгоритма $A_{j(s)}$ - стартовыми.

6) Формируется общая СПМ, моделирующая взаимодействие субъектов путем объединения соответствующих примитивных переходов в непримитивные.

К непримитивным переходам относятся

переход *FORK* (вилка), полустепень захода которого равна единице, а полустепень исхода - двум или более;

переход *JOINT* (слияние), полустепень исхода которого равна единице, а полустепень захода - двум или более;

переход *SYNCHRO* (синхронизация), полустепени захода и исхода которого равны двум или более;

переход *END/BEGIN* (конец/начало), полустепени захода и исхода которого равны единице, но в котором кончается один алгоритм (например, $A_{j(s)}$) и начинается другой (например $A_{k(s)}$).

7) Для каждого непримитивного перехода, для каждой позиции, формирующей его выходную функцию, определяются логические условия продолжения процесса в дизъюнктивной нормальной форме.

Например:

логические условия для выполнения полушага из непримитивного перехода типа *FORK* одинаковы для всех позиций, составляющих выходную функцию перехода и определяются выполнением полушага в указанный переход;

логические условия для выполнения полушага из перехода типа *END/BEGIN* определяются выполнением полушага в указанный переход;

логические условия для переходов типа *JOINT* и *SYNCHRO* могут быть таковыми, что для выполнения полушага из некоторого непримитивного перехода в позицию $a_{j[a,j(s)]}$ требуется выполнение полушагов из всех позиций множества $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$;

логические условия для переходов типа *JOINT* и *SYNCHRO* могут быть таковыми, что для выполнения полушага из некоторого непримитивного перехода в позицию $a_{j[a,j(s)]}$ требуется выполнение полушагов из любой позиции множества $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$;

логические условия для переходов типа *JOINT* и *SYNCHRO* могут быть таковыми, что для выполнения полушага из некоторого непримитивного перехода в позицию aj[a,j(s)] требуется выполнение полушагов из позиций множества $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$ при условии, что не был выполнен полушаг из позиции $a_{j[a,l(s)]}$;

логические условия для переходов типа *JOINT* и *SYNCHRO* могут быть таковыми, что для выполнения полушага из некоторого непримитивного перехода в позицию $a_{j[a,j(s)]}$ требуется выполнение любых пар полушагов из позиций множества $\{a_{j[a,k(s)]}, ..., a_{j[a,l(s)]}, ..., a_{j[a,m(s)]}\}$, и т.п.

8) Определяются плотности распределения времени выполнения полушагов из позиций в переходы.

Для аппаратных средств временные характеристики выполнения операторов алгоритма могут быть:

указаны в паспортах, технических описаниях, инструкциях по эксплуатации соответствующий приборов;

рассчитаны по временным характеристикам последовательностей команд, выполняемых прибором;

заданы в циклограммах функционирования прибора;

определены в результате эксперимента.

Для человека-оператора временные характеристики могут быть:

указаны в инструкциях по эксплуатации оборудования;

определены по методикам инженерной психологии как реакция восприятия, принятия решения, моторная и т.п. при решении аналогичных задач;

определены в результате эксперимента, в частности с использованием тренажерной техники.

9) Вероятности выполнения переходов в местах ветвления алгоритмов определяются по плотностям распределения обрабатываемых алгоритмами данных $f_{j(s)}(d_{j(s)})$ и порогам разделения данных при принятии решений.

Вопрос о законе распределения решается путем исследования статистики обрабатываемых данных в системе.

10) На основании экспертных оценок определяются временные и вероятностные характеристики алгоритма воздействия внешней среды на систему.

11) В сформированную СПМ добавляется стартовый переход, входной функцией которого является пустое множество, а выходной функцией - позиции ЭППМ, моделирующие операторы, с которых начинается функционирование соответствующих алгоритмов при запуске системы.

Таким образом, в результате выполнения пп. 1 - 11 методики формируется полная взвешенная сеть Петри-Маркова, моделирующая систему.

Список литературы

1. Привалов А.Н., Ларкин Е.В. Моделирование информационных процессов тренажерных систем: Концепция, методология, модели. - SaarbruckenDeutchland: LAPLAMBERTAcademicPublishingGmbH&Co., 2012. 230 p. ISBN 978-3-8473-3699-0.

2. Ларкин Е.В. Редукция сетей Петри-Маркова // Известия ТулГУ. Серия: Математика. Механика. Информатика. Т. 1. Вып. 3, Математика. Тула: ТулГУ, 1995. С. 99 - 109.

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

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

METHOD OF PETRI-MARKOV NET FOR MODELING COGNITIVE TECHNOLOGIES

A.N. Ivutin, E.V. Larkin, D.S. Kostomarov

An analytical model of the parallel cognitive process in which the structure that takes into account the parallelism imposed stochastic-time parameters and logical conditions of interaction processes is proposed. The technique of forming the primary structure of a Petri-Markov net and determine its probability and timing are described.

Key words: simulatorsystem, algorithm, semi-Markov process, Petri-Markov net

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

Larkin EvgeniyVasilevich, doctor of technical science, professor, manager of department, elarkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

Kostomarov Denis Sergeevich, student, denis.kostomarov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 159.953.5

ВОЗМОЖНОСТИ ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Е.В. Ларкин, А.Н. Привалов, Т.А. Акименко

Рассмотрены вопросы инженерной психологии при исследовании когнитивных процессов, представлен процесс управления оператором эргатической системой, воспроизводимый на тренажёре, разделенный на состояния, каждое из которых ссуществует в течение определенного времени; представлена динамическая модель, которая учитывает все многообразие действий, от полностью ошибочных до точных.

Ключевые слова: инженерная психология, рабочее пространство, оператор, деятельностный подход, когнитивные процессы.

При исследовании когнитивных процессов, описывающих тренажёрную подготовку операторов эргатических систем, представляется целесообразным применение аппарата инженерной психология, поскольку эта область знания занимается исследованием поведения человека при выполнении профессиональных задач. В центре внимания инженерной психологии находится человек, управляющий технологическим процессом, энергетическими системами, транспортными средствами и т.п. Инженерная психология - научная дисциплина, изучающая объективные закономерности процессов информационного взаимодействия человека и техники с целью использования их в практике проектирования, создания и эксплуатации систем «человек - машина».

Как правило, имитаторы органов управления и индикаторов воспроизводят реальные приборы рабочего места с высокой степенью подобия, поэтому предметом изучения инженерной психологии в данном случае должно служить не рационализация труда человека за пультом управления за счет изменения расположения и внешнего вида приборов управления, а инженерные методы ускоренного освоения рабочего пространства с заданной конфигурацией обучаемым оператором.

Инженерная психология тесно связана с психологией труда [6]. Для эргатических систем исследуемого класса характерным является: