

## БАЙЕСОВСКИЙ МЕХАНИЗМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ

Н. М. Новикова

*Воронежский государственный университет*

В статье рассматриваются экспериментальные исследования деятельности человека в эргатических системах управления. Показано, что при принятии решений человек-оператор использует байесовский статистический подход, основанный на субъективных вероятностях. Получены формулы, описывающие работу человека-оператора.

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое развитие эргатических (человеко-машинных) систем потребовало изучения проблемы отображения и обработки информации в условиях усложняющихся задач управления и интенсивности их решения. В настоящее время помимо использования уникальных психофизиологических свойств человека по визуальному восприятию информации актуально исследование эффективного использования мыслительных способностей человека. Таким образом, возникает задача автоматизации интеллектуальной поддержки принятия решений в системе управления.

Рассмотренные проблемы особо важны для автоматизированных систем управления сбором и обработкой стохастической информации, для систем управления воздушным движением. Одной из основных функций человека-оператора в этих системах является прием и обработка информации, предъявляемой на экране индикаторов различных типов, а также принятие решений на этой основе. При проектировании и эксплуатации эргатической системы управления возникают проблемы исследования взаимодействия человека и техники. В настоящее время для решения этой проблемы используется более 30—40 методологических подходов к человеку и технике, в которых предлагаются различные варианты оптимизации человеко-машинных систем. Это множество подходов можно разбить на два больших класса: машиноцентрический подход (используется разработчиками техники) и антропоцентрический подход (используется психологами труда и инженерными психологами). Первые исследования в 40—50-х годах базировались на машиноцентрическом подходе — «от машины (техники)

к человеку». Человека рассматривали как простое звено системы, были получены некоторые его характеристики, например, параметры передаточной функции [1]. Развитие космонавтики, авиации, автоматизированных систем показало ограниченность машиноцентрического подхода, и возникла необходимость создания антропоцентрического подхода — «от человека к машине (технике)». Этот подход был разработан в 60—70-х годах [2]. Главной задачей данного подхода становится проектирование деятельности человека-оператора. В 80—90-х годах антропоцентрический подход стал одной из ведущих теоретических позиций в зарубежных исследованиях [3]. В них решение проблем проектирования и эксплуатации эргатических систем предлагается с учетом когнитивных процессов операторской деятельности.

При создании современной техники разработчики стремятся к максимальной автоматизации систем управления. Однако, такая автоматизация, исключая человека из системы управления, приводит к непредсказуемым последствиям. В космическом полете это приводило к срывам режима сближения [4], в радиолокации — к подавлению автоматических систем обработки информации [5], в аэронавигации — к столкновению самолетов [4]. Это дает основание говорить о существовании противоречий между разработчиками техники и специалистами по человеческому фактору при проектировании автоматизированных систем. Противоречия могут быть разрешены, если подходить к проектированию и эксплуатации эргатических систем как к междисциплинарной проблеме, используя имитационное моделирование функционирования системы «человек-машина» и деятельности операторов.

Цель статьи — провести теоретический анализ и построить алгоритм принятия решения

человеком-оператором на основе имитационной модели его функционирования в эргатической системе управления.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Человек является субъектом управления и от его успешной деятельности зависит качество функционирования системы управления в целом.

Роль человека в системах управления производством, технологическими процессами, движущимися объектами, сбором и обработки информации чрезвычайно многообразна, а системы совместного функционирования имеют ряд особенностей. Первая особенность — система управления работает в реальном масштабе времени. Вторая особенность заключается в необходимости разработки модели управляемого объекта. Только при наличии модели возможно построение альтернативных решений при выборе управляющего воздействия. Третья особенность — замкнутость системы, что обеспечивается наличием обратной связи в системе управления.

Предполагается [2], что при управлении процесс приема информации человеком-оператором осуществляется, по крайней мере, на двух основных уровнях. Один (исходный) — это восприятие средств отображения информации и генерируемых ими сигналов. Средства отображения передают информацию человеку об объектах контроля и управления, а также об окружающей среде. Множество воспроизводимых сигналов, организованных по определенным правилам, является для человека-оператора информационной моделью того, что он наблюдает.

Другой уровень — это трансформация зрительного образа исходного уровня в образ управляемого объекта. На основе восприятия сигналов человек-оператор строит «мысленную картину» тех событий, информация о которых ему передается. Образ второго уровня называют «концептуальной моделью». Концептуальная модель выступает как результат декодирования человеком тех сигналов, которые он воспринял при наблюдении средств отображения (информационной модели). Полнота концептуальной модели и её адекватность отображаемому объекту (событию) зависят от того, насколько при передаче сигналов человеку учитываются закономерности восприятия и характеристики работы зрительного анализатора.

Рассмотрим основные этапы деятельности человека-оператора при решении типовых задач управления, предполагая, что работа происходит с использованием средств отображения информации.

На первом этапе оператор воспринимает информацию о состоянии объекта управления. Процесс восприятия информации включает операции обнаружения сигнала и опознание сигнала. Различие между операциями обнаружения и опознания обусловлено тем, что явления, связанные с обнаружением сигнала, протекают на уровне рецептивных полей зрительного анализатора, тогда как выделение информационного содержания возможно лишь на основе определенного опыта и знаний.

Второй этап деятельности оператора заключается в анализе информации, в её оценке и сравнении с заданными значениями контролируемых параметров объекта управления. При правильном выборе типа информационной модели и оптимальном объеме информации, предъявляемой человеку-оператору, оценка информации может производиться одновременно с её восприятием.

На третьем этапе человек-оператор решает задачу выработки стратегии управления. На этом этапе производится оценка ситуации и выбор метода воздействия на объект управления. Принятие решения практически всегда связано с предвидением, мысленным прогнозированием поведения объекта управления или системы в целом после воздействия управляющего сигнала.

Четвертый этап включает операции, которые обеспечивают приведение принятого решения в исполнение.

Большой интерес, в силу своей сложности и специфики, представляет исследование работы человека-оператора радиолокационной и телевизионной системы, составной части автоматизированных систем управления средствами сбора информации об объектах, целях и наблюдения за воздушной и космической обстановкой.

Структуру деятельности человека-оператора можно представить в виде схемы рис. 1. На этом рисунке введены следующие обозначения: 1 — восприятие 1-го признака наблюдаемого сигнала и фона; 2 — восприятие  $n$ -го признака наблюдаемого сигнала и фона; 3 — формирование целостного образа сигнала; 4 — эталонный

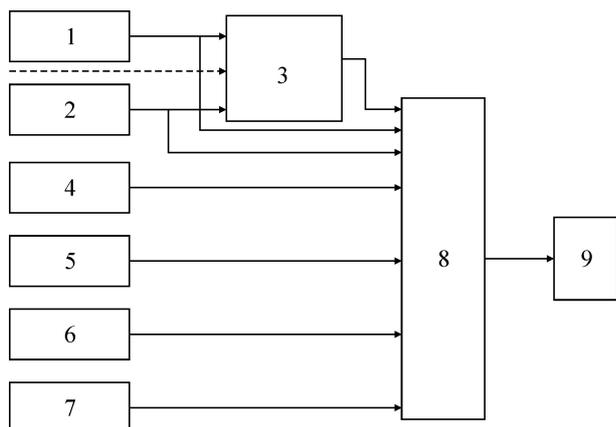


Рис. 1

образ сигнала, хранящийся в памяти; 5 — память о подобных ситуациях; 6 — целевая установка; 7 — тип решения, задаваемый ситуацией работы; 8 — формирование решения; 9 — решение. Система процессов, осуществляющих связь входа и выхода этой схемы, неизвестна, но может быть исследована путем привлечения статистической теории принятия решения и построения математической модели работы человека-оператора. Математическая модель дает количественное описание интегративных результатов зависимости выходных параметров деятельности человека-оператора от условий наблюдения сигналов и изображений на радиолокационном и телевизионном экранах.

В автоматизированных радиолокационных системах принятие решения является центральным процессом на всех уровнях обработки информации человеком. Задача выбора решений в условиях неполной информации возникает при моделировании работы человека-оператора, воспринимающего сигналы с экранов индикаторов. Схемы принятия решения человеком-оператором можно разделить на два класса: класс категоричных решений и класс вероятностных решений. Категоричное решение влечет за собой немедленное действие. Когда человек-оператор принимает вероятностное решение, он выступает или как оценщик условных вероятностей наблюдаемого события, или как оценщик апостериорных вероятностей гипотез. В этом случае оператору может помочь принять решение байесовская процедура обработки вероятностной информации.

Для выявления байесовского механизма принятия решения перед оператором поставим задачу: распознать цель среди двух отметок,

предъявляемых ему на экране индикатора, по их параметрам. Определение цели дается инструкцией.

Из [6] известно, что глаз воспринимает не абсолютную яркость, а разницу в яркостях. Предполагается, что человек-оператор производит распознавание по разнице  $\Delta = x_1 - x_2$  параметров простых изображений, например, круги, квадраты и т.д., где  $x_1$  — параметр изображения 1,  $x_2$  — тот же параметр изображения 2. В качестве параметров может быть использована не только яркость, но и размер изображений, что не влияет на алгоритм принятия решения. Если параметры отметок целей флуктуируют от предъявления к предъявлению, то целью будет называться отметка, для которой математическое ожидание размера и яркости наибольшие.

Назовем наблюдение  $\Delta > 0$  событием  $D$ . Выдвигаются две гипотезы (альтернативы):  $H_1$  — первое изображение имеет меньшее математическое ожидание;  $H_2$  — первое изображение имеет большее математическое ожидание. Если оператор принимает решение, наблюдая только одно предъявление, то, очевидно, что событие  $D$  будет являться критерием для распознавания изображений, ибо решение по одному предъявлению может основываться только на наблюдаемом значении  $\Delta$  и предварительном знании вероятностей гипотез  $P(H_1)$  и  $P(H_2)$ . Рассматриваются условия, когда априорная информация отсутствует, т.е. случай равенства вероятностей

$$P(H_1) = P(H_2) = 0,5 \text{ или } P(S_1) = P(S_2) = 0,5. \quad (1)$$

Поскольку распределения вероятностей симметричны, то при данных условиях (1) вероятность  $P_1$  правильного решения по одному предъявлению выражается через условные вероятности.

$$P_1 = P(D|S) = P(S|D). \quad (2)$$

Для отыскания вероятности правильного решения оператора по « $n$ » предъявлениям, вообще говоря, необходимо знать алгоритм работы оператора или критерий распознавания, который он применяет.

В качестве рабочей гипотезы предположим, что оператор пользуется процедурой Байеса для оценки апостериорной вероятности гипотез. При принятии решения по одному предъявлению событие  $D$  является основанием для принятия решения о том, что было изображение  $S_1$ . Апостериорная вероятность  $P(S_1|D)$  будет яв-

ляться вероятностью правильного решения, и при этом формула Байеса примет вид

$$P_1 = P(S_1 | D) = \frac{P(S_1) \cdot P(D | S_1)}{P(S_1)P(D | S_1) + P(S_2)(P(D | S_2))}. \quad (3)$$

Для условий (1) получим, что  $P_1$  совпадает с (2).

Поскольку по условию неизвестно, каким алгоритмом пользуется оператор при принятии решения по  $n > 1$  предъявлениям, предположим, что оператор при каждом новом предъявлении уточняет, переоценивает свое представление о вероятности того, что передается изображение  $S_1$  и, просмотрев « $n$ » предъявлений, каким-то образом по полученному представлению о величине  $P(S_1 | D_n)$  принимает окончательное решение. Ясно, что вероятность правильного решения не может быть больше, чем наибольшая реализация апостериорной вероятности. Это уменьшение охарактеризуем введением коэффициента консерватизма оператора  $k$ , величина которого определяется неизвестными побудительными мотивами оператора, заставляющими его принять окончательное решение. Процедура переоценки апостериорной вероятности представляется рекуррентной формулой Байеса

$$P_n = \frac{P_{n-1} \cdot P(D | S_1)}{P_{n-1} \cdot P(D | S_1) + (1 - P_{n-1})P(D | S_2)}, \quad (4)$$

где  $P_0 = P(S_1) = P(S_2) = 0,5$ .

Можно показать, что формула (4) тождественна формуле Байеса [7], если произведено  $n$  экспериментов, а результат (событие  $D_{n,m}$ ) наступил  $m$  раз.

$$P_{n,m} = \frac{P(S_1)P^m(D | S_1)[1 - P(D | S_1)]^{n-m}}{\sum_{r=1}^i P(S_r)P^m(D | S_r)[1 - P(D | S_r)]^{n-m}}, \quad (5)$$

где  $i$  — число гипотез.

Наступление события  $D$   $m$  раз из  $n$  назовем сложным событием  $D_{n,m}$ . Наибольшая величина апостериорной вероятности гипотезы реализуется при наблюдении события  $D$   $n$  раз из  $n$ .

$$P_{\max} = P_{n,n} = \frac{P(S_1)P^n(D | S_1)}{P(S_1)P^n(D | S_1) + [1 - P(S_1)]P^n(D | S_2)}.$$

Так как для нашей задачи  $P(S_1) = P(S_2) = 0,5$ , а  $P(D | S_1) + P(D | S_2) = 1$ , то

$$P_{\max} = \frac{1}{\{1 + [(1 - P(D | S_1)) / P(D | S_1)]^n\}}. \quad (6)$$

Вероятность принятия оператором правильного решения по « $n$ » предъявлениям оценим формулой (6), введя в нее коэффициент консерватизма оператора так, чтобы при  $n = 1$ , получить (2), независимо от величины  $k$ . Это можно сделать только путем возведения  $n$  в степень  $k$ , окончательно получаем формулу

$$P_n = \frac{1}{\{1 + [(1 - P_1) / P_1]^n\}^k}, \quad (7)$$

где  $P_1 = P(D | S_1)$ .

Полученная формула (7) может быть подтверждена экспериментами.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Было проведено экспериментальное исследование процессов принятия решения человеком-оператором. В этих экспериментах человек-оператор наблюдал последовательность бинарных событий  $\Delta > 0$  и  $\Delta < 0$ , когда он сравнивал два изображения по флуктуирующему параметру  $x_1$  и  $x_2$  с заданными статистиками (математическим ожиданием  $M$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma : \sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}$ ;  $\sigma_\Delta = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$ ;  $M\Delta = Mx_1 - Mx_2$ ).

Рассмотрим распознавание по одному параметру, например, размеру двух изображений простых фигур: кругов, квадратов и т.п., предъявляемых оператору несколько раз с периодом повторения показа изображений в  $1 \div 4$  сек. Параметр изображений флуктуирует от предъявления к предъявлению по нормальному закону. Задача оператора заключается в том, чтобы решить, после наблюдения заданного числа предъявлений, у какого изображения математическое ожидание параметра больше. При постановке эксперимента необходимо исключить влияние на процессы восприятия и переработки информации психофизиологических порогов зрительного анализатора. Это достигается в том случае, если взята среднеквадратичное значение флуктуаций  $\sigma_\Delta$  значительно больше разрешающей силы глаза  $\sigma_{\text{глаз}}$ , т.е.  $\sigma_\Delta \gg \sigma_{\text{глаз}}$ . По единой методике были проведены три серии экспериментов. В первой серии экспериментов человек-оператор наблюдал бумажные карточки, на которых были нарисованы окружности, радиусы их изменялись по нормальному закону. Во второй серии экспериментов оператор наблюдал импульсы на экране

дисплея, амплитуда которых изменялась также по нормальному закону. И, наконец, в 3-й серии экспериментов оператор наблюдал на экране индикатора в режиме секторного обзора яркие отметки в виде квадрата с размерами  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup>. В этой серии экспериментов по нормальному закону изменялись или только радиальные размеры отметок, или только яркость отметок. Во всех сериях экспериментов человек-оператор должен принять решение, какое из изображений больше, и сообщить свое суждение экспериментатору после каждого предъявления.

Оператору показывается серия из  $n$  предъявлений ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ), и экспериментатор фиксирует решение оператора о том, размеры или яркость какого изображения в среднем больше. Подсчитывается число правильных  $m_{\text{пр}}$  и неправильных решений  $m_{\text{н}}$  и определяется оценка вероятности, например, неправильного решения, как отношение:  $P\{R_{\text{н}}\} = m_{\text{н}} / N$ . Полный цикл работы оператора для заданных начальных условий заключается в  $N$  (сто раз) принятии решения по 1, 2, 3, 4 и 5 предъявлениям. В результате получалась зависимость вероятности того или иного решения (правильного или неправильного) от числа предъявлений. При распознавании изображений, предъявляемых на разных носителях информации, время принятия решения было ограничено и составляло 1–5 с.

Для исследования работы и построения математической модели процесса принятия вероятностных решений человеком-оператором были проведены те же три серии экспериментов, но для  $n = 10, 15, 20, 25, 30$ . Предполагалось, что человек-оператор при принятии решений использует байесовский подход, опирающийся на субъективную вероятность [7].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости правильного и неправильного решений от числа предъявлений, усредненные по операторам. Эти зависимости можно представить в виде эмпирических формул

$$P\{R_{\text{пр}}\} = 1 - \Phi\left(-\frac{M\Delta}{\sigma_{\Delta}} \sqrt{n}\right) - C, \quad (8)$$

$$P\{R_{\text{н}}\} = \Phi\left(-\frac{M\Delta}{\sigma_{\Delta}} \sqrt{n}\right) + C, \quad (9)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$  — функция нормального распределения,  $M\Delta$  — математическое ожидание разницы параметров,  $\sigma_{\Delta}$  — среднеквадратичное отклонение.

Величина поправки  $C$ , учитывающая индивидуальные психофизиологические свойства оператора и усредненная по операторам, составила  $C = 0,095$ .

Для практического использования полученных результатов производится их усреднение по операторам и начальным условиям. Результаты усреднения всех измерений для всех операторов представлены на рис. 2, где по оси абсцисс отложена обобщенная координата  $\gamma = \frac{M\Delta}{\sigma_{\Delta}} \sqrt{n}$  начальных условий, по оси орди-

нат — вероятность правильного решения, усредненная по операторам, в квантилях нормального распределения. Прямая 1 получена для дисплея, прямая 2 — для окружностей, прямая 3 — для индикатора секторного обзора. Из рис. 2 видно, что все три группы экспериментальных данных достаточно хорошо ложатся на прямые. Наибольший разброс точек наблюдается при распознавании отметок на экране индикатора в режиме секторного обзора. Это связано с тем, что работа оператора с индикатором в режиме секторного обзора более утомительна. Группировка экспериментальных данных вокруг прямых говорит о том, что в сложном алгоритме работы оператора большой удельный вес имеет

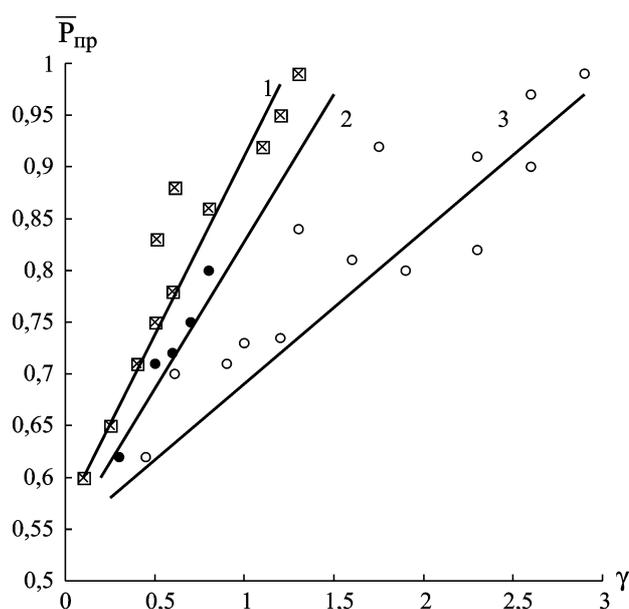


Рис. 2

оценка среднего значения величины наблюдаемого параметра отметки по  $n$  предъявлениям.

Полученные данные всех трех серий экспериментов можно описать формулой (7). Для оценки коэффициента консерватизма человека-оператора преобразуем формулу (7) к виду

$$\lg \lg \frac{P_n}{1 - P_n} = k \lg n + \lg \lg \frac{P_1}{1 - P_1}. \quad (10)$$

Если изложенные выше представления адекватны работе оператора, то экспериментальные точки должны ложиться на прямую (10). Величина  $k$ , найденная как тангенс угла наклона прямой (10), для 30 операторов, работавших при различных начальных условиях, может быть оценена для среднестатистического оператора выражением следующего вида

$$k = \frac{0,054}{P_1 - 0,5}. \quad (11)$$

Все эксперименты с операторами проводились для числа предъявлений не более пяти. Период предъявления был равен двум секундам, на наблюдение затрачивалось не более 10 секунд. Время оперативной памяти человека имеет такой же порядок [8]. Можно предположить, что при значительном увеличении времени наблюдения алгоритм работы оператора может измениться по сравнению с алгоритмом принятия решения по  $n \leq 5$ . С целью изучения механизма принятия вероятностных решений были проведены эксперименты для  $n = 10, 15, 20, 25$  и 30 предъявлений. Полученные экспериментальные данные хорошо описываются формулой (7). Следовательно, формула (7) также хорошо представляет вероятность решения по большому числу (до 30) предъявлений, как и для  $n \leq 5$ . Можно считать, что эта формула достаточно хорошо отражает логику работы оператора независимо от времени действия оперативной памяти. Индивидуальность оператора отражена в этой формуле: а) в значении  $P_1$  — здесь проявляется физиологическая сторона — порог различения; б) в значении степени консерва-

тизма  $k$  — здесь отражается различный подход оператора к процедуре принятия решения (уровень ответственности, степень обученности, его субъективная вероятность и т.п.). Поэтому величина  $k$  для одного и того же оператора может быть различной в разные периоды его работы. Поскольку величина  $k$  распределена еще и по операторам, то и зависимость  $k(P_1)$  может быть найдена только для среднестатистического оператора и при среднестатистических условиях.

Итак, в результате проведенных исследований можно сделать вывод, что получены результаты, которые на основе байесовского механизма принятия решения описывают интеллектуальные возможности человека-оператора. Эти результаты могут быть использованы для автоматизации интеллектуальной поддержки принятия решений в системах управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы / И. Е. Цибулевский. — М.: Наука, 1981. — 288 с.
2. Ломов Б.Ф. Человек и техника / Б. Ф. Ломов. — М.: Сов. радио, 1966. — 464 с.
3. Johannsen G. Levis A.H., Stassen H.G. Theoretical problems in man-machine systems and their experimental validation // Automatica. — 1994. — V. 30, № 2. — P. 217—231.
4. Филд А. Международная практика организации и обслуживания воздушного движения / А. Филд / Пер. с англ. Л. Ю. Полушкиной, Д. Н. Тарасевич / Под ред. Л. К. Щербакова — М.: Транспорт, 1989. — 254 с.
5. Канащенков А.И. Концепция совершенствования авионики и облик современных систем управления вооружением / А. И. Канащенков // Радиотехника. — 2002. — № 8. — С. 73—83.
6. Мешков В.В. Основы светотехники / В. В. Мешков, А. Б. Матвеев. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
7. Хей Дж. Введение в методы байесовского статистического вывода / Дж. Хей / Пер. с англ. А. А. Рывкина — М.: Финансы и статистика, 1987. — 355 с.
8. Глезер В.Д. Зрение и мышление / В. Д. Глезер. — Л.: Наука, 1985. — 260 с.