

А. Н. ЛУКЬЯНОВ, М. В. ФРОЛОВ
 (Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА *

В статье описывается структурная схема системы человек — машина с управлением функциональным состоянием оператора. Приводятся значения коэффициентов отличия некоторых функциональных состояний от состояния «оперативного покоя» оператора и решается статистическая задача обнаружения сигналов состояния внимания и состояния эмоционального напряжения человека.

В настоящее время информационные комплексы, автоматические системы контроля и управления, создаваемые для решения многих задач, чаще с неполной исходной информацией содержат «живое звено» — человека-оператора. Эффективность работы человека-оператора, а следовательно, и всей так называемой системы человек — машина во многом определяется функциональным состоянием последнего [1—5], поэтому проблема поддержания функционального состояния человека-оператора на заданном уровне и объективный контроль за его состоянием имеют важное теоретическое и прикладное значение.

Управление функциональным состоянием человека и контроль (так называемая автостимуляция) могут быть сведены к одноконтурной замкнутой системе управления [6—13]. Характерная особенность отмеченной системы состоит в том, что управляемым объектом является сам человек, а управление его функциональным состоянием и контроль осуществляются посредством произвольных реакций. По такому же

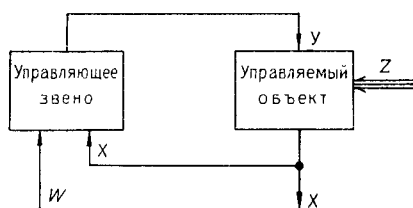


Рис. 1.

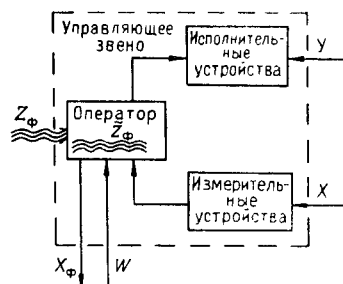


Рис. 2.

* Публикуя эту статью, редколлегия обращает внимание на важность поднятых вопросов и необходимость детализации их в направлении взаимодействия человека и измерительной информационной системы.

принципу могут быть построены и более совершенные устройства [14]. Биоэлектронные протезы, использующие сигналы, возникающие при произвольных двигательных реакциях человека [15, 16], в лучшем случае строятся по известной схеме (рис. 1, 2), в которой целевой функцией являются сигналы, связанные с произвольными двигательными реакциями человека.

Большой интерес представляет объединение двух типов схем в одну «двухкольцевую» схему с целью повышения эффективности работы системы человек — машина.

Структурная схема системы человек — машина с управлением функциональным состоянием человека-оператора

Типичной схемой системы человек — машина может служить замкнутая система управления [17] (см. рис. 1). Данная схема не учитывает возмущений (Z_{ϕ} , \tilde{Z}_{ϕ}), действующих на управляющее звено, и влияния этих возмущений на качество управления объектом.

На рис. 2 в развернутом виде показано управляющее звено, которое объединяет: исполнительные устройства, служащие для воздействия на объект, измерительные устройства, предназначенные для передачи информации о состоянии объекта (человека-оператора), выполняющего операции в соответствии с целевой функцией W . Характеристики управляющего звена при наличии в нем человека-оператора оказываются существенно зависимыми от функционального состояния оператора [1—5], обусловливаемого возмущениями внешней (Z_{ϕ}) и внутренней (\tilde{Z}_{ϕ}) среды. Поэтому нам представляется, что для непрерывного учета функционального состояния при управлении процессом X схема рис. 1 должна быть дополнена и превращена в «двухкольцевую» замкнутую систему управления (рис. 3). В этой схеме первое «кольцо» представляет

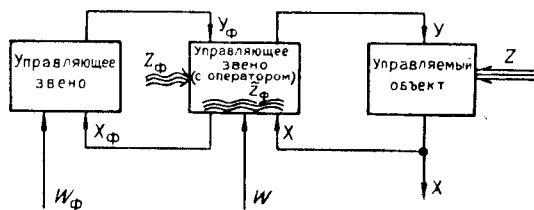


Рис. 3.

тем, что управляемым объектом является сам оператор, а управляемым процессом — его функциональное состояние. X_{ϕ} — информация, характеризующая некоторым образом функциональное состояние оператора. U_{ϕ} — управляющее воздействие на оператора, приводящее его в требуемое со-

стояние. В случае недопустимого отклонения функционального состояния от требуемого воздействие U_{ϕ} в зависимости от характера управляемого процесса X обеспечивает либо прекращение управления процессом X , либо дублирование оператора. W_{ϕ} — целевая функция для «кольца» управления функциональным состоянием оператора.

Поскольку одним из наиболее важных проявлений изменения согласованности психических процессов и функций в ходе деятельности человека является изменение характеристик внимания [18] и критические условия различными операторами переносятся по-разному [18], то для исследования задачи управления функциональным состоянием человека были выбраны два характерных состояния оператора: состояние внимания и состояние эмоционального напряжения (тревога, страх).

Экспериментальное исследование параметров сигналов, характеризующих состояние внимания и эмоционального напряжения

Несмотря на успехи, достигнутые физиологией в последние годы, мы все еще не располагаем надежными данными, характеризующими состояние внимания и тревоги, которые можно было бы использовать в расчетах.

Эксперимент. В одной из серии опытов здоровые взрослые люди выполняли функции слежения и управления, а в другой — им подавался

Ритмы электроэнцефалограммы, их частотные диапазоны и характерные свойства

Ритм электроэнцефалограммы	Частотный диапазон*, кол. сек	Характерные свойства ритма	
		по В. А. Кожевникову, Р. М. Менерскому [20]	по П. И. Гуляеву [19]
Дельта (Δ)	Меньше 4	Преобладает над другими ритмами: 1) при патологии мозга, 2) во время сна, 3) при наркозе.	Преобладает над другими ритмами: 1) при патологии мозга, 2) глубоком сне, 3) иногда у здоровых взрослых людей.
Тета (Θ)	4--8	1. Незначительное количество волн представляет нормальное явление. 2. Выраженность Θ -ритма зависит от 1) возраста, 2) степени умственного напряжения.	1. У здоровых взрослых людей встречается реже, чем А- и В-ритмы. 2. У детей нормальная составляющая электроэнцефалограммы. 3. Связан с эмоциями. 4. У взрослых людей иногда связан с проявлением агрессивного поведения.
Альфа (А) Наиболее выражен в теменно-затылочных областях мозга.	8--13	1. Возрастает по амплитуде при закрывании глаз в бодрствующем состоянии. 2. Слабо выражен в состоянии возбуждения или умственного напряжения. 3. Открывание глаз, внешние раздражители и умственное напряжение вызывают депрессию А-ритма. 4. Обычно амплитуда А-волн претерпевает более или менее периодическое увеличение и ослабление.	1. Характерен для большинства здоровых людей во время бодрствования. 2. Депрессия амплитуды А-ритма: 1) не вызывается определенным видом сенсорных раздражений, 2) вызывается умственной работой, 3) не вызывается привычными звуками, 4) всегда вызывается светом, 5) иногда вызывается внутренними процессами без внешнего повода. 3. Явно связан с вниманием.
Бета (В)	Больше 13	1. В функциональном отношении связывается с сенсорной системой. 2. Является ли признаком нормы или патологии, сказать нельзя (решается вопрос в каждом конкретном случае).	1. Не проявляет депрессии на сенсорные раздражители. 2. Часто не у всех людей регистрируется в ЭЭГ бодрствующего состояния. 3. Частота неустойчива (даже в течение опыта).

* По рекомендации МФОЭ и КНФ.

ряд зрительных сигналов, среди которых были эмоционально значимые, причем степень значимости определялась смысловой стороной сигнала.

Во время экспериментов осуществлялась регистрация электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при биполярном затылочно-теменном отведении, электрокардиограммы (ЭКГ) и некоторых других физиологических характеристик (кожно-гальванический рефлекс, дыхание, объемный пульс). ЭЭГ подвергалась частотному анализу пятью полосовыми фильтрами анализатора японской фирмы «Nihon Kohden» (см. таблицу). Результаты частотного анализа фиксировались на бумаге. Кроме того, с выходов фильтров напряжения Δ , Θ , A , B_1 , B_2 -ритмов ЭЭГ подавались на ограничитель, а с ограничителя на интегратор, показания которого периодически (через каждые 10 сек) считывались и регистрировались на бумаге (δ , ϕ , α , β_1 , β_2).

Существенный признак ЭКГ — временной интервал T_R между зубцами R , поэтому ЭКГ заменялась новым процессом η , ординаты которого в отсчетные моменты времени пропорциональны T_R исходного процесса.

Результаты эксперимента

1. У человека, адаптированного к условиям работы и находящегося в спокойном бодрствующем состоянии «оперативного покоя», функции α и η являются случайными стационарными процессами с нормальным законом распределения.

2. Состояние внимания и состояние тревоги приближенно можно охарактеризовать теми же случайными процессами α и η , но с иными значениями параметров распределения (математическое ожидание, дисперсия). Так, если дисперсию обозначить σ_{ji}^2 , а математическое ожидание j -го процесса для i -го состояния m_{ji} , то отличие i -го состояния «оперативного покоя» можно характеризовать коэффициентами отличия:

$$k = \frac{\sigma_{j\pi}}{\sigma_{ji}}; a = \frac{m_{ji} - m_{j\pi}}{\sigma_{j\pi}}. \quad (1)$$

Коэффициенты отличия для состояния внимания по процессу α имеют значения $1,2 \leq k \leq 2,2$ и $-0,4 \leq a \leq 1,4$, а для состояния тревоги по процессу η — $1,3 \leq k \leq 3,0$ и $1 \leq a \leq 5,6$.

Обнаружение сигнала

Как показал эксперимент, устойчивое на интервале наблюдения состояние внимания (эмоциональное напряжение, «оперативный покой») может быть охарактеризовано некоторой совокупностью N случайных нормальных стационарных процессов. Параметры распределения каждого из этих процессов — математическое ожидание m и дисперсия σ^2 — определяются состоянием оператора. Рассмотрим одну из задач первичной обработки информации — обнаружение сигнала. Эта задача решается с помощью метода критерия Неймана — Пирсона. Вопросы отождествления информации по всей совокупности N не исследуются, так как они довольно сложны и являются предметом отдельной работы.

Для упрощения задачи будем полагать, что оператор может находиться в одном из двух состояний — например в состоянии «оперативного покоя» или в состоянии внимания — и что переход из одного состояния в другое происходит достаточно быстро по сравнению с интервалом наблюдения.

Представим для состояния «оперативного покоя» некоторый случайный процесс $y(t)$ в виде

$$y(t) = n(t); m = 0; \sigma^2 \neq 0. \quad (2)$$

Тогда состояние внимания, или эмоционального напряжения, можно описать выражением

$$y(t) = kg(t - t_0)n(t) + mg(t - t_0), \quad (3)$$

где k, m — некоторые величины, характеризующие соответственно дисперсию и математическое ожидание процесса $y(t)$ при наличии сигнала;
 $g(t - t_0)$ — единичная функция;
 t_0 — момент прихода сигнала.

Разумеется, такое представление сигнала не характеризует полностью случаи изменения состояния внимания, или эмоционального напряжения, у оператора в процессе наблюдения, но как приближенная аппроксимация позволяет при достаточно простом математическом аппарате получить интересные результаты.

Решение задачи обнаружения сигнала структуры (3) затрудняется в силу незнания априорного распределения параметров сигнала, в частности, момента его прихода (t_0) на интервале выборки $[0 - T]$. Поэтому будем отыскивать обнаружитель, оптимальный для случая присутствия (отсутствия) сигнала на всем интервале наблюдения, но, конечно, дающий проигрыш в характеристиках обнаружения при $0 < t_0 < T$. Обнаружитель запаздывает с ответом на величину T , с чем в нашем случае можно согласиться. Критерий Неймана — Пирсона позволяет при заданной вероятности ложной тревоги F максимизировать вероятность правильного обнаружения D . Запишем отношение правдоподобия (λ) для общего случая, когда значения процесса $Y(t)$ ($y(t)$ — реализация $Y(t)$) в отсчетные моменты времени t_1, \dots, t_n коррелированы, что имеет место, например, при обработке ЭКГ [21]:

$$\lambda = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi^n |\Lambda_s|}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{g,h}^n Q_{gh}^s (y_g - m_g) (y_h - m_h) \right]}{\frac{1}{\sqrt{2\pi^n |\Lambda|}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{g,h}^n Q_{gh} y_g y_h \right]}, \quad (4)$$

где $|\Lambda|, |\Lambda_s|$ — детерминанты ковариационной матрицы процесса $Y(t)$ при отсутствии и наличии сигнала;

Q_{oh}, Q_{gh}^s — элементы обратной ковариационной матрицы процесса $Y(t)$ при отсутствии и наличии сигнала;

n — число дискретов на интервале наблюдения;

y_g — дискретное значение процесса $y(t)$ в момент времени t_g ;

m_g — дискретное значение сигнала в момент времени t_g ;

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n.$$

Введем обозначения:

$$k^2 = \frac{\sigma^2}{\sigma_s^2}; \quad 1 \leq k^2 \leq E. \quad (5)$$

Тогда можно записать следующее:

$$|\Delta| = k^{2n} |\Delta_s|. \quad (6)$$

После преобразования (4) с учетом (5) и (6) получим:

$$\lambda_{km} = k^n \exp\left(\frac{L}{2}\right); \quad (7)$$

$$L = \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k^2) y_g y_h + \sum_{g,h}^n m k^2 Q_{gh} (y_g + y_h) - \sum_{g,h}^n Q_{gh} m^2 k^2. \quad (8)$$

Оптимальная схема обнаружителя для независимых параметров k и m , имеющих априорные распределения $p(m)$ и $p(k)$, описывается следующим образом [22]:

$$\bar{\lambda} = \int_1^E \int_0^C \lambda_{km} p(m) p(k) dm dk, \quad (9)$$

где $(1 - E)$, $(0 - C)$ — соответственно пределы интегрирования по k и m .

Решение о наличии сигнала принимается по правилу: $\bar{\lambda} \geq u$ — сигнал есть; $\bar{\lambda} < u$ — сигнала нет, где u — некоторое пороговое значение.

Интеграл вида (9) в элементарных функциях не берется; кроме того, отсутствие точного знания априорных законов распределения параметров $p(k)$ и $p(m)$ может сделать алгоритм обработки (9) отличающимся от оптимального. Поэтому мы ограничимся исследованием обнаружителя для точно известного сигнала, а затем покажем, как будут меняться характеристики такого обнаружителя при отклонении параметров полезного сигнала от параметров канала [23]. Для отыскания схемы обнаружителя точно известного сигнала (параметры k , m заданы) воспользуемся монотонной функцией λ

$$\ln \lambda = \frac{1}{2} \left[\ln k^n + \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k^2) y_g y_h + \sum_{g,h}^n k^2 m Q_{gh} (y_g + y_h) - \sum_{g,h}^n k^2 m^2 Q_{gh} \right]. \quad (10)$$

Решение о наличии или отсутствии сигнала теперь будем принимать по некоторой функции φ : $\varphi \geq u^*$ — сигнал есть; $\varphi < u^*$ — сигнал отсутствует,

$$\text{где} \quad \varphi = \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k^2) y_g y_h + \sum_{g,h}^n k^2 m Q_{gh} (y_g + y_h) \quad (11)$$

содержит лишь члены, зависящие от входной последовательности [22].

Уравнение (11) определяет окончательную схему оптимального обнаружителя сигнала с известными параметрами k и m . Для построения характеристик такого обнаружителя необходимо найти функцию распределения случайной величины φ [24]. При достаточно большом числе независимых дискретов входного процесса $y(t)$ можно считать, что φ имеет нормальное распределение [22]. Найдем параметры (k_0, m_0) такого распределения при наличии и отсутствии сигнала и настройке канала обнаружения. При отсутствии сигнала математическое ожидание будет определяться выражением

$$\begin{aligned} m_{\varphi_0} &= \bar{\varphi} = \overline{\sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k_0^2) y_g y_h + \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 Q_{gh} (y_g + y_h)} = \\ &= \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k_0^2) \overline{y_g y_h} + \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 Q_{gh} \overline{(y_g + y_h)} = (1 - k_0^2) n, \end{aligned} \quad (12)$$

а дисперсия —

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi_0}^2 &= \overline{\varphi^2} - \bar{\varphi}^2 = \overline{\left[\sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k_0^2) y_g y_h + \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 Q_{gh} (y_g + y_h) \right]^2} - \\ &- m_{\varphi_0}^2 = \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} (1 - k_0^2)^2 \overline{y_g y_h y_k y_l} + \\ &+ 2k_0^2 m_0 (1 - k_0^2) \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} \overline{(y_g + y_h) y_g y_h} + \\ &+ k_0^4 m_0^2 \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} \overline{(y_g + y_h) (y_k + y_l)} - m_{\varphi_0}^2, \end{aligned}$$

где

$$\overline{y_g y_h y_k y_l} = R_{gh} R_{kl} + R_{gk} R_{hl} + R_{gl} R_{kh}; \quad \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} R_{gh} R_{kl} = n^2;$$

$$\overline{y_g y_h y_k} = 0; \quad \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} R_{gk} R_{hl} = n;$$

$$\overline{y_g} = 0; \quad \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n Q_{gh} Q_{kl} R_{gk} = \sum_{g,h}^n Q_{gh};$$

R_{gh} — элемент прямой ковариационной матрицы процесса $Y(t)$ (сигнал отсутствует).

После преобразования получим

$$\sigma_{\varphi_0}^2 = 2(1 - k_0^2)^2 n + 4k_0^4 m_0^2 \sum_{g,h}^n Q_{gh}. \quad (13)$$

Найдем теперь математическое ожидание m_{φ_s} и дисперсию $\sigma_{\varphi_s}^2$ случайной величины φ при полностью известных параметрах сигнала

$$\begin{aligned}
m_{\varphi_s} &= \overline{\varphi_s} = \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1-k^2) \overline{y_g^s y_h^s} + \sum_{g,h}^n Q_{gh} k^2 m \overline{(y_g^s + y_h^s)} = \\
&= \sum_{g,h}^n (1-k^2) \overline{(y_g^* + m)(y_h^* + m)} Q_{gh} + \sum_{g,h}^n Q_{gh} k^2 m \overline{(y_g^* + y_h^* + 2m)},
\end{aligned}$$

где

$$y_g^s = y_g^* + m_0; \quad \overline{y_g^*} = 0.$$

Если $\overline{y_g^* y_h^*} = R_{gh}^s$ и $R_{gh}^s = \frac{R_{gh}}{k_0^2}$, то при $k=k_0$, $m=m_0$;

$$m_{\varphi_s} = \frac{(1-k_0^2)}{k_0^2} n + (1+k_0^2) m_0^2 \sum_{g,h}^n Q_{gh}; \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\varphi_s}^2 &= \overline{\varphi_s^2} - \overline{\varphi_s}^2 = \left[\sum_{g,h}^n (1-k^2) Q_{gh} (y_g^* + m)(y_h^* + m) + \right. \\
&\left. + \sum_{g,h}^n k^2 m Q_{gh} (y_g^* + y_h^* + 2m) \right]^2 - m_{\varphi_s}^2 = \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n (1-k^2)^2 Q_{gh} Q_{kl} (y_g^* + \\
&+ m)(y_h^* + m)(y_k^* + m)(y_l^* + m) + 2 \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n (1-k^2) Q_{gh} Q_{kl} k^2 m (y_g^* + \\
&+ m)(y_h^* + m)(y_k^* + y_l^* + 2m) + \sum_{g,h}^n \sum_{k,l}^n k^4 m^2 Q_{gh} Q_{kl} (y_g^* + y_h^* + 2m)(y_k^* + \\
&+ y_l^* + 2m) - m_{\varphi_s}^2.
\end{aligned}$$

Опуская некоторые преобразования, окончательно получим ($k=k_0$, $m=m_0$):

$$\sigma_{\varphi_s}^2 = \frac{(1-k_0^2)^2 2n}{k_0^4} + \frac{4m_0^2}{k_0^2} \sum_{g,h}^n Q_{gh}. \quad (15)$$

Для достаточно малых изменений дисперсии ($k^2 \approx 1$) или математического ожидания процесса $Y(t)$ при наличии сигнала алгоритм обнаружителя (11) упрощается и не зависит от параметров настройки k_i , m_i :

$$\varphi' = \sum_{g,h}^n Q_{gh} (y_g + y_h) \quad (k^2 \approx 1); \quad (16)$$

$$\varphi'' = \sum_{g,h}^n Q_{gh} y_g y_h \quad (m \approx 0). \quad (17)$$

Математическое ожидание и дисперсия случайных величин φ' , φ'' определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} m_{\varphi_0}' &= 0; \quad \sigma_{\varphi_0}^2 = 4m_0^2 \sum_{g,h}^n Q_{gh} \\ m_{\varphi_0}'' &= (1 - k_0^2) n; \quad \sigma_{\varphi_0}^2 = 2(1 - k_0^2)^2 n \end{aligned} \right\} \text{при отсутствии сигнала;} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{\varphi_s}' &= 2m_0^2 \sum_{g,h}^n Q_{gh}; \quad \sigma_{\varphi_s}^2 = 4m_0^2 \sum_{g,h}^n Q_{gh} \\ m_{\varphi_s}'' &= \frac{(1 - k_0^2)}{k_0^2} n; \quad \sigma_{\varphi_s}^2 = 2 \frac{(1 - k_0^2)}{k_0^4} n \end{aligned} \right\} \text{при наличии сигнала.} \quad (19)$$

Запишем теперь закон распределения случайной величины φ :

$$P_0(\varphi) = \frac{1}{\sigma_{\varphi_0} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi - m_{\varphi_0})^2}{2\sigma_{\varphi_0}^2} \right] \quad \text{при отсутствии сигнала;} \quad (20)$$

$$P_s(\varphi) = \frac{1}{\sigma_{\varphi_s} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi - m_{\varphi_s})^2}{2\sigma_{\varphi_s}^2} \right] \quad \text{при наличии сигнала.} \quad (21)$$

Вероятность ложной тревоги будет равна

$$F = 1 - \Phi \left[\frac{(u - m_{\varphi_0})}{\sigma_{\varphi_0}} \right], \quad (22)$$

а вероятность правильного обнаружения —

$$D = 1 - \Phi \left[\frac{(u - m_{\varphi_s})}{\sigma_{\varphi_s}} \right], \quad (23)$$

где

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{\psi^2}{2}} d\psi \quad \text{— функция Лапласа;}$$

u — некоторый порог.

Рассмотрим теперь случай, когда параметры сигнала отличаются от параметров настройки канала ($m \neq m_0$, $k \neq k_0$). Найдем математическое ожидание и дисперсию случайной величины φ :

$$\begin{aligned} \tilde{m}_{\varphi_s} &= (1 - k_0^2) \sum_{g,h}^n Q_{gh} (y_g^* + m) (y_h^* + m) + \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 Q_{gh} (y_g^* + y_h^* + 2m) = \\ &= (1 - k_0^2) \frac{n}{k^2} + \sum_{g,h}^n Q_{gh} (1 - k_0^2) m^2 + 2 \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 m Q_{gh}; \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{\varphi_s}^2 &= \left[\sum_{g,h}^n Q_{g,h} (1 - k_0^2) (y_g^* + m) (y_h^* + m) + \sum_{g,h}^n k_0^2 m_0 Q_{gh} (y_g^* + \right. \\ &\quad \left. + y_h^* + 2m) \right]^2 - \tilde{m}_{\varphi_s}^2. \end{aligned}$$

Опуская преобразования, запишем

$$\tilde{\sigma}_{\varphi_s}^2 = \frac{2(1-k_0^2)^2 n}{k^4} + \sum_{g, h}^n Q_{gh} \frac{4k_0^2 m_0 [2m - 2k_0^2 m + k_0^2 m_0] + 4m^2 (1-k_0^2)^2}{k^2}. \quad (25)$$

Можно видеть, что при равенстве параметров полезного сигнала (k, m) параметрам настройки канала (k_0, m_0) формулы (24), (25) становятся эквивалентными формулам (14), (15). Для этого случая характеристики обнаружения описываются, как и ранее, уравнениями (22), (23) с

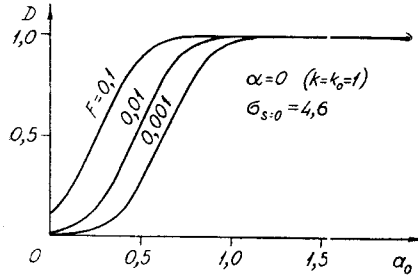


Рис. 4.

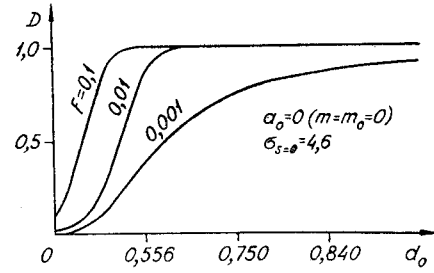


Рис. 5.

заменой в (23) m_{φ_s} и σ_{φ_s} на \tilde{m}_{φ_s} и $\tilde{\sigma}_{\varphi_s}$. По формулам (22), (23) построены характеристики обнаружения; при этом прямая ковариационная матрица имела вид

$$R_{gh} = R(0) e^{-(g-h)\tau},$$

что характерно, например, для процесса α .

На рис. 4 представлена зависимость вероятности правильного обнаружения от коэффициента отличия $\alpha_0 = \frac{m_s}{\sigma_{s=0}}$ при $k=1$ для точно из-

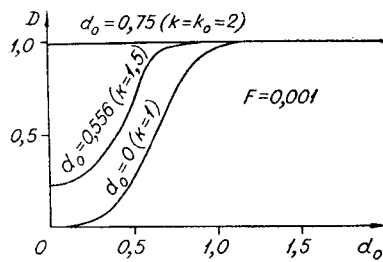


Рис. 6.

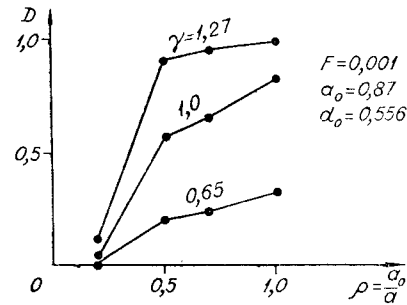


Рис. 7.

вестного сигнала ($k=k_0, m=m_0$). Индекс s характеризует наличие или отсутствие сигнала.

На рис. 5 дана характеристика вероятности правильного обнаружения D для фиксированных значений ложной тревоги в функции параметра d_0 при $\alpha_0=0$:

$$d_0 = \frac{k_0^2 - 1}{k_0^2} = \frac{\sigma_s^2 = 0 - \sigma_s^2}{\sigma_s^2 = 0}.$$

График на рис. 6 описывает более общий случай: для вероятности ложной тревоги $F=0,001$ построены характеристики правильного обнаружения в функции коэффициента отличия a_0 при фиксированных значениях параметра d_0 .

На рис. 7 приведены кривые вероятности правильного обнаружения D для вероятности ложной тревоги $F=0,001$ в функции параметра ρ и некоторых значений γ , показывающие изменение качества обнаружения при отклонении параметров полезного сигнала m и k от параметров настройки канала m_0 и k_0 :

$$\rho = \frac{a_0}{a} = \frac{m_0}{m}; \quad \gamma = \frac{d_0}{d} = \frac{k^2(k_0^2 - 1)}{k_0^2(k^2 - 1)}.$$

Выводы

Для повышения эффективности работы системы человек — машина предлагается структурная схема с управлением функциональным состоянием человека-оператора.

Процессы α и η , коррелированные соответственно с состоянием внимания и состоянием эмоционального напряжения, могут быть использованы в системе управления функциональным состоянием человека.

Для процессов α и η получены количественные значения коэффициентов отличия (k, a) состояний внимания и эмоционального напряжения от состояния «оперативного покоя».

На основании полученных экспериментальных данных решается статистическая задача обнаружения сигналов эмоционального напряжения и состояния внимания оператора.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Виноградов. Физиология трудовых процессов. Л., Изд-во ЛГУ, 1958.
2. Е. А. Деревянко. Взаимотношение между некоторыми, физиологическими и психологическими факторами при развитии утомления в процессе трудовой деятельности.— Тезисы докладов I съезда общества психологов. М., Изд-во АПН РСФСР, вып. 1.
3. С. А. Косилов. Исследования проявлений динамического стереотипа в производственной трудовой деятельности.— Вопросы физиологии труда (материалы конференции). М., Медгиз, 1957.
4. С. Л. Рубинштейн. Бытие и сознание. М., Изд-во АН СССР, 1958.
5. К. С. Точилов. Работоспособность человека как фазный процесс. Материалы ленинградской зональной психологической конференции. Л., 1958.
6. Н. П. Бехтерева, В. В. Усов. Методика прерывистой фотостимуляции в ритме собственных потенциалов мозга при регистрации электроэнцефалограммы.— Физиологический журнал, 1960, т. 46, № 1.
7. В. Г. Жуков. Использование биоэлектрической активности мозга для автостимуляции корковой деятельности.— 20-е совещание по проблемам высшей нервной деятельности.— Тезисы и рефераты докладов. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963.
8. И. С. Иванов, П. В. Симонов. Искусственные вегето-сензорные обратные связи.— Журн. высш. нервн. деят., 1965, т. 15, вып. 4.
9. I. F. Dusaily. La psycho-commande et la psycho-reaction.— Mesures et contrôle industr., 1963, v. 28, № 309, pp. 223—225.
10. T. Mulholland. The Electroencephalogram as an Experimental Tool in the Study of Internal Attention Gradients.— Trans. N. Y. Acad. Sci., 1962, v. 24, № 6, pp. 664—669.

11. T. Mulholland, S. Runnals. Evolution of Attention and Alertness With a Stimulus-Brain Feedback Loop.—*Electroencephalogr. and Clin. Neurophysiol.*, 1962, v. 14, № 6, pp. 847—852.
12. H. W. Shipton. An Electronic Trigger Circuit as an Aid to Physiological Research.—*J. Brit. Instn. Radio Engrs.*, 1949, v. 4, pp. 374—383.
13. V. I. Walter, W. G. Walter. The Central Effects of Rhythmic Sensory Stimulation.—*Electroencephalogr. and Clin. Neurophysiol.*, 1949, v. 1, pp. 57—86.
14. П. В. Симонов, Ф. Е. Темников. Адаптивные биоэлектронные системы восприятия, обучения и управления.—*Бионика*, М., изд-во «Наука», 1965.
15. А. Е. Кобринский и др. Проблемы биоэлектрического управления.—*Труды I Международного конгресса Международной федерации по автоматическому управлению*. М., Изд-во АН СССР, 1961, т. 2.
16. C. K. Battye and oth. The Use of Myo-Electric Currents in the Operation of Prostheses.—*J. Bone and Joint Surg.*, 1955, v. 37-B, № 3, pp. 506—510.
17. А. А. Фельдбаум. Основы теории оптимальных автоматических систем. М., Физматгиз, 1963.
18. Б. Ф. Ломов. Человек и техника. Л., Изд-во ЛГУ, 1963.
19. П. И. Гуляев. Электрические процессы коры мозга человека. Л., Изд-во ЛГУ, 1960.
20. В. А. Кожевников, Р. М. Мещерский. Современные методы анализа электроэнцефалограммы. М., Медгиз, 1963.
21. Т. Андерсен. Введение в многомерный статистический анализ. М., Физматгиз, 1963.
22. Л. А. Вайнштейн, В. Д. Зубаков. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М., изд-во «Советское радио», 1960.
23. А. Е. Башаринов, Б. С. Флейншман. Методы статистического последовательного анализа и их радиотехнические приложения. М., изд-во «Советское радио», 1962.
24. К. Хелстром. Статистическая теория обнаружения сигналов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.

*Поступила в редакцию
14 октября 1965 г.*