

УДК 612.821

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО И ВИБРОТАКТИЛЬНОГО КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ СЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© Исак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
firsovgi@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются некоторые особенности, возникающие при создании методики планирования и проведения экспериментов, в целях изучения возможностей анализа человеком-оператором информации от совместной работы вибротактильного и зрительного каналов. Излагаются алгоритмические подходы обработки экспериментальных данных, в том числе алгоритм гомогенизации результатов экспериментов по различным характеристикам качества работы человека-оператора применительно к группам испытуемых. На основе полученных экспериментальных данных проводится анализ возможностей решения задач оператором при использовании зрительного и тактильного каналов поступления информации совместно и порознь.

Ключевые слова: сенсорная информация, вибротактильное воздействие, планирование эксперимента, дисперсионный анализ.

FEATURES OF PLANNING AND PROCESSING THE RESULTS OF ACTIVE EXPERIMENTAL STUDIES OF BIOMECHANICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE ANALYSIS OF THE INTERACTION OF VISUAL AND VIBROTACTILE CHANNELS OF SENSORY INFORMATION TRANSMISSION

© I.N. Statnikov, G.I. Firsov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
firsovgi@mail.ru

Abstract. Some features that arise when creating a methodology for planning and conducting experiments are considered in order to study the possibilities of analyzing information from the joint work of vibrotactile and visual channels by a human operator. Algorithmic approaches to processing experimental data are described, including an algorithm for homogenizing the results of experiments on various characteristics of the quality of human operator work in relation to groups of subjects. Based on the experimental data obtained, the analysis of the possibilities of solving problems by the operator when using visual and tactile channels of information receipt together and separately is carried out.

Key words: sensory information, vibrotactile impact, experiment planning, dispersion analysis.

Выполнение исследования такой сложной биомеханической системы как человек-оператор, действующего в экстремальной ситуации, может проводиться как в условиях пассивного (например, при оценке качества поддержания вертикальной позы тела человека [1-4]), так и активного эксперимента, при котором на человека-оператора оказываются различные воздействия. Одним из подобных исследований является анализ взаимодействия зрительного и вибротактильного афферентных каналов передачи сенсорной информации, который представляют большой интерес как с точки зрения медицинских [5], реабилитационных [6], спортивных [7] и психодиагностических [8] приложений, так и в задачах синтеза современных эргатических систем "человек - машина - среда" [9], в которых человек берет все или часть функций по управлению системой.

Это приводит к двум, относительно автономным по практическому исполнению, но в немалой степени влияющим друг на друга по результатам, этапам исследования А и Б. Заметим, что такое разделение на этапы и есть пример планирования экспериментов в широком смысле, как момент правильной (экономной) организации экспериментальных исследований. Рассмотрим содержание этих этапов:

А: Разработка критериев качества информационного вибротактильного канала "внешняя среда - оператор"; построение рационального по множеству критериев такого канала; определение условий и рациональных способов адаптации оператора к такому каналу.

Б: Разработка множества критериев качества многоканальной (смешанной) системы; определение условий и рациональных способов адаптации оператора к информационному вибротактильному каналу и к подсистеме управления системой; рациональный синтез всей такой системы по множеству критериев.

Успешному проведению обоих этапов способствовало бы наличие какой-либо теории (пусть даже имеющей локальное применение), дающей приближенные характеристики системы и соответствующие значения ее параметров. Такой общепринятой теории на сегодняшний день, насколько известно, нет. Отдельно по множеству проблем каждого из указанных этапов имеются априорные теоретические сведения (теория информации, физиология сенсорных анализаторов, психофизика, теория систем, теория автоматического регулирования и управления, некоторые эмпирические факты и т.д.). Перечисленные предварительные сведения и составляют тот априорный теоретический минимум, на базе которого должны быть организованы экспериментальные исследования.

Такой путь - это многочисленные эксперименты, результатами которых могут быть не только чисто практические ответы, но и отдельные теоретические построения, касающиеся анализа и синтеза заданной эргатической системы [10]. Объем и достоверность экспериментов тесно увязаны между собой в количественном смысле. Так, достоверность значительно зависит от тщательного учета факторов, оказывающих влияние на работу системы (например, влажность и температура воздуха, освещенность и яркость, давление воздуха, психометрические параметры оператора, параметры технических подсистем эргатической системы и т.д.) [11].

Уже одно только количество перечисленных факторов свидетельствует о необходимости проведения огромном числе экспериментов (натурных и модельных). Например, если принять во внимание 10 вышеперечисленных факторов, каждый из которых меняет свои значения только на двух уровнях, то общее количество экспериментов составит $N = 2^{10} = 1024$. Ситуация осложняется тем, что многие факторы не поддаются контролю или точному учету (например, многие психофизиологические параметры человека). Следовательно, любой результат таких экспериментальных исследований - случайный, и его оценка носит вероятностный характер [12]. В этом случае повышение доверительной вероятности P

полученных результатов связано с еще более резким увеличением числа экспериментов N . Так, пусть результаты экспериментов по какому-либо критерию (например, частоте правильных опознаний сигнала) подчиняется нормальному распределению со средним значением частичной совокупности, равным \bar{x} . Тогда общее среднее значение гипотетической генеральной совокупности \bar{x}_0 лежит в пределах $\bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{1-\alpha} S / \sqrt{N}$, S^2 - эмпирическая оценка дисперсии частичной совокупности, $P = 1 - \alpha$ - доверительная вероятность, $t_{1-\alpha}$ - параметр распределения Стьюдента. Если задать $P = 0,99$, коэффициент размаха (изменчивости) выборки $v = S / \bar{x} = 0,2$ и при этом потребовать, чтобы $\Delta x / \bar{x} = 0,01$, то получим, что $N = 400 t_{1-\alpha}^2$. Ориентируясь на значение $t_{1-\alpha}$ при $P = 0,99$ и $N \rightarrow \infty$, т.е. $t_{0,01} = 2,33$, найдем, что с каждым испытуемым нужно проделать по $N \approx 2172$ экспериментов. Если же ужесточить требования к величине доверительной вероятности, то при тех же условиях, но для $P = 0,995$, получим, что $N = 400 t_{0,005}^2 = 400 \times 2,576^2 \approx 2654$. Ясно, что ни по временным, ни по материальным ресурсам такие эксперименты невозможно провести.

Второй путь (и это предлагаемая и в значительной мере реализованная методика) - это попытка уменьшить число экспериментов при сохранении доверия к их результатам за счет специальной организации исследования и разработки алгоритмов обработки информации, учитывающих конечный объем выборок. К специальной организации относится идея рандомизации [13-15] проведения экспериментов (как во времени, так и в пространстве). Например, если из десяти принятых во внимание факторов пять являются неконтролируемыми, то вовсе не обязательно проводить по 1024 экспериментов с каждым испытуемым. Необходимо рандомизировать эксперименты в оставшемся пятимерном пространстве факторов, т.е. по специальным схемам организовать случайные сочетания двух уровней каждого из пяти параметров. Рандомизация экспериментов позволит существенно уменьшить влияние остальных неконтролируемых факторов на исход экспериментов. И тогда, для каждого испытуемого - $N = 2^5 = 32$ эксперимента. При этом детальное планирование экспериментов позволяет:

- а) определить объем экспериментов;
- б) определить области варьирования факторов, влияющих на результаты исследования;
- в) выбирать схемы экспериментов и методы обработки экспериментальных данных в каждом конкретном исследовании.

Тогда оказывается возможным использовать дисперсионный, регрессионный и другие виды статистического анализа данных. Кроме того, на основе подобного подхода к обработке результатов предварительных экспериментов, объем последующих экспериментальных исследований также сокращается.

Теперь перечислим те факты, при которых возможно использование методологии планирования экспериментов [16-18]. В данном случае необходимо знать:

- четко сформулированную каким-либо способом (например, задаются критерии пригодности конечных результатов исследования) цель работы, которая по ходу экспериментов может, конечно, уточняться (главным образом, в смысле постановки задачи);
- временные и материальные ресурсы, выделяемые для проведения исследований (ближние и дальние сроки проведения работы, количество испытуемых и их возможная оплата и т.д.);
- наличие априорных теоретических и экспериментальных сведений по существу рассматриваемой задачи;
- степень технической оснащенности экспериментальных исследований и степень автоматизации как в смысле управления экспериментом, так и в плане обработки

результатов (без последнего вообще не приходится рассчитывать на реальные успехи в исследовании).

Первичная статистическая обработка собранного экспериментального материала основывается на принципе классификации числовых значений исследуемого параметра в однородные выборки (гомогенизации). Это позволяет решить следующие вопросы:

- 1) получить разбиение группы испытуемых на подгруппы (вплоть до подгруппы из одного испытуемого);
- 2) существенно повысить статистическую достоверность моментных характеристик распределения какого-либо анализируемого параметра за счет укрупнения (гомогенизации) выборки;
- 3) резко сократить последующий объем экспериментов;
- 4) и, наконец, само по себе образование подгрупп позволяет проанализировать связь между исследуемым параметром и психофизиологическими характеристиками членов подгруппы.

При этом отметим, что идея первичной статистической обработки собранного материала строится на отказе от отбраковки так называемых ошибок (разумеется, за исключением таких, которые определяются не действиями испытуемого, например, сбой используемой аппаратуры и в измерительном тракте, непредвиденные резкие изменения окружающей среды, если этот фактор сам по себе не входит в условия эксперимента и т.д.).

Распознавание однородных совокупностей собранного статистического материала основывается на применении параметрических критериев Фишера и Стьюдента [19]. Параметрический анализ по методу Стьюдента проводится с использованием формулы

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

где t - расчетное значение критерия Стьюдента, \bar{x}_1 и \bar{x}_2 - выборочные средние в группах из n_1 и n_2 членов, S_1^2 и S_2^2 - соответственно выборочные дисперсии. Если $t \geq t_\alpha$ при $\nu = n_1 + n_2 - 2$, где t_α - теоретическое значение критерия Стьюдента при том же ν , то нулевая гипотеза о статистической неразличимости \bar{x}_1 и \bar{x}_2 отвергается с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$, где α - уровень значимости. Основываясь на значениях статистики t , используя критерии Фишера и Стьюдента формируют группы из H_k испытуемых, средние значения регистрируемых параметров у которых статистически неразличимы. Здесь $H = \sum_{k=1}^p H_k$, p - число групп.

Важно, что критерии Фишера и Стьюдента малочувствительны к отклонениям реального распределения случайной величины от нормального. Распознавание осуществляется на трех уровнях интегральной обработки: образование однородных выборок по исследуемому параметру для каждого испытуемого; образование однородных выборок с учетом проведенных серий экспериментов для каждого испытуемого (т.е. выявление возможной неоднородности статистического материала по времени); образование однородных выборок по каждому параметру для группы испытуемых. Этот последний уровень позволяет рассчитывать характеристики некоторого «усредненного оператора», что соответствует в психологии человеко-машинных систем понятию тотальной адаптации человека к машине. Однако весьма важным представляется и определение контингентной (групповой) адаптации испытуемых к машине, что приводит в целом к экономичным решениям задачи синтеза эргатических систем.

Разработанная методика, предназначенная для реализации такой первичной статистической обработки, основана на идее 4-х мерного информационного параллелепипеда, на осях которого определяются числовые значения следующих величин: h - номер испытуемого ($h = \overline{1, H}$); l - номер серии экспериментов ($l = \overline{1, L}$); i - номер реализации в l -той серии ($i = \overline{1, I}$); j - номер уровня (или градации) числового значения предъявляемого стимула в i -той реализации l -той серии ($j = \overline{1, J}$); в общем случае это может быть и векторная величина. Нетрудно видеть, что даже при небольших значениях I , H , L и J только по одному выходному параметру получаем значительное количество единиц числовой информации. Так, при $I = 20$, $H = 10$, $L = 10$ и $J = 10$, общее число единиц первичной числовой информации по одному выходному параметру $N_0 = I \cdot H \cdot L \cdot J = 20000$ единиц. Если же число выходных регистрируемых параметров m , то $N_0 = 20000 \cdot m$ и при $m = 3$ достигает 60000 единиц. Поэтому для сокращения времени счета целесообразно использование рекуррентных процедур вычисления оценок среднего и дисперсии.

Разработанная методика и соответствующее программное обеспечение использовалось при исследовании взаимосвязи вибротактильного и зрительного анализаторов. В задачи проведенного цикла исследований, выполненных на специальной установке, обеспечивающей подачу вибротактильных воздействий [20-24] на кожные рецепторы человека в сочетании с определенными световыми стимулами, входило:

- 1) определение возможностей и способностей испытуемых принять и усвоить вибротактильную информацию;
- 2) определение способностей испытуемого на основе полученной вибротактильной информации принять правильное решение о пространственной ориентации источника сигнала, расположенного вне местонахождения испытуемого;
- 3) определение обучаемости и устойчивости приобретенных навыков восприятия и переработки вибротактильной информации;
- 4) определение степени дифференциальности "вибротактильного чувствования" пространства;
- 5) построение математических зависимостей (моделей) надежности и обучаемости испытуемого от различных существенных факторов его функционального состояния и особенностей деятельности.

Поскольку источником информации, подаваемой на вход тактильного канала, служили колебания вибратора (вибротактильного индикатора), передаваемые на кожу и оказывающие воздействия на механорецепторы кожи человека, анализ проводился с учетом следующих факторов:

- параметров стимула: величины усилия, развиваемого вибротактильным индикатором на коже человека; длительности стимулов, передаваемых на вибротактильный индикатор; интенсивности амплитуд, выдаваемых на вибротактильный индикатор; изменения частоты вибрационных раздражений; длительности пауз между посылками сигналов на вибротактильный индикатор;
- количества вибротактильных индикаторов;
- размеров вибротактильных индикаторов, площади контакта вибротактильных индикаторов с кожей;
- вида и уровня помехи;
- места расположения вибротактильного индикатора на теле человека;
- вариантов комбинации включения вибротактильного индикатора;
- индивидуальности испытуемого.

Градации перечисленных факторов могут служить основанием для выбора вариантов кодировки сигнала. Важным фактором в смысле выбора оптимального варианта кода является та или иная комбинация включения вибротактильного индикатора при их фиксированном числе. Сюда следует отнести и такие важные факторы, как места расположения вибротактильных индикаторов на теле человека и индивидуальность испытуемого. Индивидуальность испытуемого определяется, в свою очередь, совокупностью других факторов (антропометрические данные, психологические и психофизиологические характеристики, интеллектуальный уровень и т.д.).

Анализ перечисленных факторов позволяет спланировать эксперименты с целью выявления максимальных (в определенном смысле «оптимальных») возможностей испытуемого по восприятию и переработке вибротактильной информации, определения факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на его возможности. Очевидно, что в план экспериментов могут войти только факторы, поддающиеся количественному измерению. Заметное значение приобрели факторы второго уровня воздействия: производные от некоторых параметров сигнала.

Разумеется, если значения всех факторов фиксированы, т.е. задаются волевым порядком, то само по себе планирование экспериментов отпадает и остается задача сбора и обработки требуемой статистической информации.

Основные положения по организации статистической обработки и перечень задач, решаемых на этапе А, представлены в работе [25]. На кожу испытуемого оказывалось вибротактильное воздействие, параметры которого и служили факторами для оценки «вибротактильного чувствования» испытуемого. Все эксперименты на этапе А были разбиты на три группы (табл. 1) с учетом только зрительного или вибротактильного каналов, а также при их совместной работе. В соответствии с разработанной методикой были проведены эксперименты по изучению и сравнительному анализу свойств зрительного и вибротактильного информационных каналов у 12 испытуемых. В качестве критериев оценки эффективности работы каналов принимались: частота правильного распознавания сигналов, время восприятия и переработки информации и общее время выполнения всего цикла.

Таблица 1

Группы	Содержание экспериментов
А.1	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым только при работе зрительного канала
А.2	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым только при работе вибротактильного канала
А.3	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым при совместной работе вибротактильного и зрительного канала

Реализация всех трех групп экспериментов представляется логически обоснованной по следующим причинам. Во-первых, анализ результатов всех трех групп экспериментов позволит выяснить условия согласованного взаимодействия зрительного и вибротактильного каналов. Дело в том, что реально оператор работает всегда в условиях одновременного воздействия сигнала на все анализаторы (за исключением экстремальных обстоятельств), а каждый сенсорный (а, значит, информационный) канал у человека обладает своим психологическим рефрактерным периодом (это период переключения внимания оператора с обработки первого сигнала, когда уже пришел следующий). Согласованного взаимодействия

сенсорных анализаторов можно достичь только при достоверном знании и учете рефрактерных периодов. Тогда можно ожидать, что при совместной работе двух анализаторов деятельность оператора окажется эффективнее (уменьшится время принятия решения и увеличится частота правильных ответов), что особенно важно на этапе Б решения исходной задачи.

Во-вторых, эксперименты группы А.3 могут позволить количественно оценить дифференцируемость “вибротактильного чувствования” испытуемым пространством, и, вообще, подтвердить сам факт возникновения такого чувствования. Для этого в группе А.3 нужно провести такие эксперименты (после того, когда считается, что обучение закончилось). По предъявлению испытуемому какой-либо комбинации вибротактильных индикаторов, привязанной к некоей зоне пространства, необходимо опознать эту же зону с помощью светового маркера при условии, что все световые маркеры задействованы (например, лампочки).

Теперь, если правильный ответ по узнаванию комбинации вибротактильных индикаторов обозначить через $f_1(+)$, а неправильный - через $f_1(-)$, и, соответственно, правильный ответ по распознаванию зоны пространства по световому маркеру через $f_2(+)$, а неправильный - через $f_2(-)$, то возможны четыре варианта исхода одного эксперимента: $f_1(+)$ и $f_2(+)$, $f_1(+)$ и $f_2(-)$, $f_1(-)$ и $f_2(+)$, $f_1(-)$ и $f_2(-)$.

Тогда, если число пар $f_1(+)$ и $f_2(+)$ будет максимальным из общего числа экспериментов, то это будет свидетельством возникновения “вибротактильного чувствования” пространства; если максимальным окажется суммарное число пар $f_1(+)$ и $f_2(-)$, $f_1(-)$ и $f_2(+)$, то говорить о наличии факта появления такого “вибротактильного чувствования” нельзя; если же максимальным окажется число пар $f_1(-)$ и $f_2(-)$, то в этом случае нужно вернуться к анализу условий проведения экспериментов и методов обучения испытуемого.

Поскольку важным критерием качества работы испытуемого является время реакции, то в не меньшей степени исследователя интересует производная от этой величины по какому-либо фактору, т.е. скорость реагирования испытуемого. Для статистической оценки скорости реагирования необходимо в экспериментах (после обучения) дать возможность испытуемому сделать несколько попыток найти правильный ответ, если сразу этого не получилось. Конечно, число этих попыток нужно заранее ограничить некоторой величиной n^* , которая может быть уточнена экспериментальным путем.

Проблема обучения традиционно является одной из центральных в психологической науке [26]. На сегодняшний день существует много различных методик обучения и операторов, и испытуемых (в этом плане различия могут быть существенными) [8, 7, 27]. На этапе А важен акцент на том, что в экспериментах участвуют испытуемые.

Общим моментом во многих методиках обучения является признание важным изучение динамики обучения, а не только итоговых результатов. Этот же факт важен и при обучении на этапе Б исследования, где понятия “оператор” и “испытуемый” полностью являются синонимами.

Все обучение рассматривается как двуединый процесс: теоретическое и практическое. Первое связано с абстрактным изучением расположения командных кнопок на пульте управления и соответствия между каждой кнопкой и определенной, выделенной только качественно, зоной пространства (конечно, здесь возникают проблемы рациональной мнемоники в расположении кнопок на пульте управления, количества пространственных зон и их признаков типа “слева-сверху-сбоку” или каких-то других и т.д.). Практическое обучение проводится непосредственно на пульте управления.

Считается, что теоретическое обучение должно предшествовать практическому в целях повышения эффективности и достоверности последнего. Эффективность теоретического

обучения при прочих равных условиях должна быть обеспечена четкой инструкцией, в которой ясно определены формы и размеры морального и материального стимулирования испытуемого.

Естественно, что за динамикой обучения нужно следить при практической учебе. Для этого предлагается простой алгоритм. Пусть одним из выходных параметров служат значения частоты правильных ответов f_{ijhl} по распознаванию стимула (h -м испытуемым в i -ой реализации по j -му признаку в l -ой серии), которая и будет рассматриваться как критерий обученности. Пусть на $(i - 1)$ и i -м шагах мы имеем соответствующие оценки дисперсий этих величин: $s_{i-1,jhl}^2$ и $s_{i,jhl}^2$. Тогда в качестве оценки обученности (обучения) введем величину $\varepsilon_i^{(jhl)}$, равную:

$$\varepsilon_i^{(jhl)} = \frac{s_{i-1,jhl}^2}{s_{i-1,jhl}^2 + s_{i,jhl}^2}. \quad (1)$$

Физический смысл этой величины состоит в следующем:

если $s_{i,jhl}^2 \gg s_{i-1,jhl}^2$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \rightarrow 0$, т.е. испытуемый обучается данной работе в рассматриваемой экспериментальной ситуации плохо;

если $s_{i,jhl}^2 \approx s_{i-1,jhl}^2$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \approx 0,5$, т.е. можно полагать, что имеет место процесс обучения и его нужно продолжать;

если $s_{i,jhl}^2 \ll s_{i-1,jhl}^2$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \rightarrow 1$, т.е. в рассматриваемой экспериментальной ситуации имеет место эффективное обучение. Иначе говоря, $0 \leq \varepsilon_i^{(jhl)} \leq 1$, а с точки зрения обученности удовлетворительными являются значения $\varepsilon_i^{(jhl)} \in [0,5;1] \subseteq [0;1]$.

Конечно, величина $\varepsilon_i^{(jhl)}$ носит выборочный характер, и для характеристики ее распределения нужно вычислить оценку математического ожидания и доверительные интервалы, что служит основой для назначения числа экспериментов.

Использование оценки $\varepsilon_i^{(jhl)}$ полезно по двум причинам. Во-первых, динамику обучения испытуемого можно проследить не только в одной серии, но и от серии к серии. В этом случае

$$\varepsilon_l^{(jl)} = \frac{s_{l-1,jh}^2}{s_{l-1,jh}^2 + s_{l,jh}^2}, \quad (2)$$

где $s_{l-1,jh}^2$ и $s_{l,jh}^2$ - оценки дисперсии по j -му признаку для h -го испытуемого в $(l - 1)$ и l -ой сериях соответственно. И, конечно, $0 \leq \varepsilon_l^{(jh)} \leq 1$.

Во-вторых, в случае, когда работа системы (и обучение) оцениваются по m критериям качества, то в соответствии с (1) и (2) могут быть получены оценки обучаемости испытуемых

по m критериям совместно: $E_i^{(jkl)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varepsilon_{ik}^{(jhl)}$, $E_l^{(jk)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varepsilon_{lk}^{(jh)}$. В этом случае $0 \leq E_i^{(jhl)} \leq 1$ и

$$0 \leq E_l^{(jh)} \leq 1.$$

Кроме знания динамики обучения конкретного испытуемого важен также итоговый результат обученности, который численно предлагается оценивать по значениям коэффициента размаха (вариации) выборки v . В одной серии по одному признаку и для одного испытуемого находим:

$$v_{jhl} = \sigma_l / E_l, \quad (3)$$

где E_I - математическое ожидание случайной величины, а σ_I - ее среднеквадратичное отклонение от математического ожидания. Ясно, что в идеале $v_{jhl} \rightarrow 0$. Но при этом не безразлично, при каком значении E_I будет достигнут $\min v_{jhl}$. Поэтому необходимо вводить пороговую величину E_I^* .

Оценка (3) удобна при экзаменовке испытуемого на предмет его обученности (готовности к участию в дальнейших экспериментах).

Вводится 5-ти бальная шкала: если при $E_I \leq E_I^*$ (а при другом критерии качества работы это условие может поменяться на противоположное) выполняется неравенство $v_{jhl} \leq v^*$, то испытуемый получает 5 баллов; если $v^* < v_{jhl} \leq 2v^*$, то испытуемый получает 4 балла; если $2v^* < v_{jhl} \leq 3v^*$, то испытуемый получает 3 балла, если $v_{jhl} > 3v^*$, то ставится 2 балла. Значения E_I^* и v^* должны уточняться экспериментальным путем. Для начала следует брать $v^* = 0,1$ и $E_I^* = 0,5$.

Критерием готовности испытуемого после экзамена служит максимальная сумма баллов. В целом оценка пригодности испытуемого к дальнейшей экспериментальной работе рассматривается как двухкритериальная: необходима максимальная сумма баллов на экзамене, но в то же время важное значение имеет качество динамического процесса обучения (желательно как можно меньше получать выбросов в кривых обучения (1) и (2), т.е. по существу должно наблюдаться стабильное увеличение скорости правильных ответов по каждому критерию).

Предлагаемые методики обучения полностью применимы и для этапа Б. В этом случае могут появиться новые критерии качества работы.

В предположении, что задачи этапа А решены, исследования на этапе Б могут вестись двумя путями.

Первый путь. При наличии математических моделей управляемого объекта и передаточной функции оператора все натурные эксперименты можно проводить с использованием математического моделирования на компьютере. В этом случае в пакетах типа Simulink, AnyLogic, Model Vision Studium (MVS), LabView, Bridgeview набираются уравнения управляемого объекта, передаточная функция оператора, функции управления, а на компьютере реализуются алгоритмы сбора и результатов экспериментов.

Анализ и синтез эргатической системы тогда нужно проводить, используя методы математической теории планирования экспериментов. Этот путь существенно сокращает временные и материальные затраты на весь этап Б и экспериментальную доводку результатов математического моделирования.

Второй путь. При наличии только математической модели управляемого объекта результаты этапа Б достигаются на основе проведения полунатурных экспериментов: математическая модель, функции управления набираются на компьютере, а отработка алгоритмов управления осуществляется экспериментальным путем на комплексе "оператор - экспериментальный стенд".

Рассмотрим, в качестве примера, результаты цикла экспериментов с группой испытуемых. В экспериментах принимало участие до 12 человек, ранее не обученных, пригодных по медицинским показаниям к участию в экспериментах (хотя, разумеется, сами эти показания у всех испытуемых различные). Обработка экспериментальных данных носит констатирующий характер, т.е. после проведения всевозможных экспериментов с операторами (испытуемыми). Все эксперименты подразделяются по условиям их проведения:

а) световая индикация зон пространства: сферическая поверхность кабины, где проводятся испытания, разбита на J зон, в каждой из них вспыхивает лампочка; время горения и паузы между зажиганиями лампочки формируются по закону равномерно распределенных по вероятности чисел; кабина ярко освещена; лампочки тускло горят (закрашены); тишина за кабиной не соблюдалась - группа А2;

б) световая индикация зон пространства: содержание экспериментов такое же, как и в А2; кабина затемнена; лампочки горят ярко; вне кабины затемненное пространство - группа А1;

в) совместная индикация фиксированных зон пространства: световая и вибротактильная; кабина ярко освещена; лампочки горят тускло; тишина за кабиной не соблюдалась; испытуемые сидели в наушниках - группа АВ;

г) вибротактильная индикация зон пространства: каждой из J зон сферической поверхности кабины соответствует сигнал определенной кодировки, реализуемый соответствующей комбинацией вибротактильных индикаторов (датчиков), установленных на теле испытуемого; кабина ярко освещена; внекабинное пространство освещено; лампочки не горели; испытуемые одевали наушники. - группа В.

Следует иметь в виду, что по ходу исследования тактика проведения экспериментов не менялась в соответствии с получаемыми оценками.

Обработка экспериментальных данных по всем группам экспериментов проводилась по трем критериям качества работы испытуемых:

Критерий 1 - f - частота правильных ответов (или эмпирическая вероятность правильного ответа для одного испытуемого);

Критерий 2 - T_1 - время восприятия и переработки информации, с;

Критерий 3 - T_2 общее время выполнения всей работы, с.

Таблица 2

Группы экспериментов	№№ критериев	Статистические характеристики				
		\bar{X}_{0k}	σ_{0k}	$v_{0k} = \sigma_{0k} / \bar{X}_{0k}$	Δ_{0k}, Δ	N_{0k}
А1	1	0,9219	0,2683	0,2910	1,207; [0;1]	7200
	2	1,3930	0,8288	0,5950	3,730; [0;5,123]	6638
	3	3,2390	1,2300	0,3797	5,535; [0;8,744]	6638
А2	1	0,7301	0,4439	0,6313	1,998; [0;1]	7200
	2	6,6870	3,5650	0,5331	16,043; [0;22,80]	5257
	3	7,7550	3,5700	0,4603	16,065; [0;23,82]	5257
В	1	0,9325	0,2509	0,2691	1,130; [0;1]	2520
	2	1,2036	0,5807	0,4825	2,613; [0;3,817]	2350
	3	1,8032	0,7005	0,3885	3,152; [0,4,960]	2350
АВ	1	0,9683	0,1752	0,1810	0,788; [0,18;1]	1989
	2	1,3590	1,0560	0,7770	4,752; [0;6,111]	1926
	3	3,2630	1,4020	0,4300	6,309; [0;9,572]	1926

Результаты расчетов представлены в таблице 2, где указаны следующие статистические характеристики: \bar{X}_{0k} - общее среднее значение критерия; σ_{0k} - общее среднеквадратическое отклонение; $v_{0k} = \sigma_{0k} / \bar{X}_{0k}$ - коэффициент изменчивости выборки; $\Delta_{0k} = 4,5\sigma_{0k}$, Δ - ширина половины доверительного интервала при отсутствии вида функции распределения и доверительный интервал; N_{0k} - общее число единиц измерения (испытаний).

Анализ данных таблицы 2 показывает, что в среднем частота правильных ответов в группе экспериментов В больше в 1,28 раза, чем в группе А2, и всего лишь на 1% выше, чем в группе А1. Значит, при плохих условиях для работы зрительного канала информации вибротактильный канал гораздо эффективнее при выполнении заданной работы. Но еще более эффективной по этому критерию качества оказывается совместная работа двух каналов: $\bar{X}_{01} = 0,9683$ в группе экспериментов АВ в 1,33 раза больше, чем в А2, и на 5% и 3,7% больше, чем в группах А1 и В соответственно.

На высокую эффективность в группе АВ указывает и то обстоятельство, что σ_{01} в этой группе существенно меньше, чем во всех остальных группах. Значит, даже необученным операторам совместная работа двух информационных каналов помогает безошибочнее выполнять заданную работу.

Иначе обстоит дело при анализе скорости выполнения заданной работы. Здесь по значениям \bar{X}_{02} и \bar{X}_{03} наилучший результат наблюдается в группе экспериментов В, что подтверждается и наименьшими значениями коэффициентов вариации: $\sim 48\%$ и $\sim 39\%$ соответственно для второго и третьего критериев качества работы. Этот результат можно объяснить тем, что использование вибротактильного канала информации при известной степени обучения происходит почти на рефлексном уровне.

И чем проще алгоритм управления колебаний сердечника вибротактильного индикатора, тем это сравнение точнее. В этих экспериментах алгоритм управления был чрезвычайно прост: линейное изменение частоты колебаний сердечника вибротактильного индикатора в зависимости от степени приближения к распознаваемой зоне.

Следующим этапом обработки экспериментальной информации был дисперсионный анализ, позволяющий выделить и оценить отдельные факторы (фактор субъекта, фактор индицируемой зоны, фактор времени и обученности), вызывающие изменчивость средних значений анализируемых критериев качества выполнения требуемой работы испытуемыми.

При этом проверка значимости оценок дисперсий случайной величины производилась при помощи таблиц значений статистики Фишера (параметрический критерий значимости Фишера) [28].

Если вычисляемое (наблюденное) значение F окажется меньше табличного (при одних и тех же степенях свободы и при одном и том же уровне значимости), то не имеется оснований приписывать какое-либо значение влиянию рассматриваемого фактора на изменчивость средних значений рассматриваемой случайной величины; если же наблюдаемое значение F окажется больше табличного, то рассматриваемый фактор неслучайно влияет на изменчивость средних значений, т.е. в этом случае имеем дело с существенно неоднородной выборкой.

Анализ таблицы 3 показывает, что даже при уровне значимости $p = 0,005$ во всех группах экспериментов каждый из факторов H , J и L оказывает существенное, неслучайное влияние на каждый из рассматриваемых критериев, т.е. во всех случаях для каждого фактора $F_{эмп} > F_{0,005}$. Так с вероятностью $P \geq 1 - 0,005 = 0,995$ каждый из указанных факторов оказывает существенное влияние на анализируемые критерии (фактор субъекта (H), фактор индицируемой зоны (J), фактор времени обученности (L)).

А это значит, что результаты исследований, приведенные в [29,30], приводят к вычислению значений границ доверительных интервалов (при отсутствии знания реального вида функций распределения), носящих не содержательный или непрактический характер. Так для частоты правильных ответов ($k = 1$) всюду получен доверительный интервал $[0;1]$.

Разумеется, если для частоты правильных ответов принять нормальное распределение, то при $p = 5\%$ уровне значимости для всех трех групп экспериментов нижняя граница этого

доверительного интервала вырастает и примерно во всех случаях доверительный интервал сужается = $[0,4;1]$.

Для критериев T_1 и T_2 доверительные интервалы их значений настолько широки, что лишают всякой почвы для сравнения эффективностей различных способов индикации зон пространства. Таким образом, необходимо решить задачу дефиниции однородных выборок для всех групп экспериментов и по каждому критерию качества работы испытуемых.

Таблица 3

Группа	№№ критериев	Факторы	Степени свободы		$F_{эмп}$	Теоретические значения F при различных значениях p			Примечание
			v_1	v_2		0,050	0,025	0,005	
АВ	1	H	8	1980	3,578	1,940	2,190	2,740	$J(1\div 11), L(1,2)$
		J	10	1978	2,732	1,845	2,065	2,550	$H(1,3\div 8,10,11), L(1,2)$
		L	1	1987	9,988	3,840	5,012	7,880	$H(1,3\div 8,10,11), J(1\div 11)$
	2	H	8	1917	80,620	1,940	2,190	2,740	$J(1\div 11), L(1,2)$
		J	10	1915	3,678	1,845	2,065	2,550	$H(1,3\div 8,10,11), L(1,2)$
		L	1	1924	179,328	3,840	5,012	7,880	$H(1,3\div 8,10,11), J(1\div 11)$
	3	H	8	1917	53,439	1,940	2,190	2,740	$J(1\div 11), L(1,2)$
		J	10	1915	22,683	1,845	2,065	2,550	$H(1,3\div 8,10,11), L(1,2)$
		L	1	1924	147,162	3,840	5,012	7,880	$H(1,3\div 8,10,11), J(1\div 11)$
В	1	H	6	1515	16,054	2,090	2,410	3,090	$J(1\div 12), L(1\div 3)$
		J	11	2508	4,316	1,798	2,003	2,455	$H(1,2,5\div 8,11), L(1\div 3)$
		L	2	2517	23,008	2,990	3,690	5,300	$H(1,2,5\div 8,11), J(1\div 12)$
	2	H	6	2343	67,283	2,090	2,410	3,090	$J(1\div 12), L(1\div 3)$
		J	11	2338	6,554	1,798	2,003	2,455	$H(1,2,5\div 8,11), L(1\div 3)$
		L	2	2347	214,452	2,990	3,690	5,300	$H(1,2,5\div 8,11), J(1\div 12)$
	3	H	6	2343	11,317	2,090	2,410	3,090	$J(1\div 12), L(1\div 3)$
		J	11	2338	11,922	1,798	2,003	2,455	$H(1,2,5\div 8,11), L(1\div 3)$
		L	2	2347	357,723	2,990	3,690	5,300	$H(1,2,5\div 8,11), J(1\div 12)$
А1	1	H	5	7194	40,927	2,210	2,570	3,350	$J(1\div 30), L(4\div 7)$
		J	29	7170	12,395	1,424	1,515	1,708	$H(1,3,6,8,10,11), L(4\div 7)$
		L	3	7196	89,743	2,600	3,120	4,280	$H(1,3,6,8,10,11), J(1\div 30)$
	2	H	5	5251	25,565	2,210	2,570	3,350	$J(1\div 30), L(4\div 7)$
		J	29	5227	29,153	1,424	1,515	1,708	$H(1,3,6,8,10,11), L(4\div 7)$
		L	3	5223	4,525	2,600	3,120	4,280	$H(1,3,6,8,10,11), J(1\div 30)$
	3	H	5	5221	16,533	2,210	2,570	3,350	$J(1\div 30), L(4\div 7)$
		J	29	5227	34,785	1,424	1,515	1,708	$H(1,3,6,8,10,11), L(4\div 7)$
		L	3	5223	9,930	2,600	3,120	4,280	$H(1,3,6,8,10,11), J(1\div 30)$
А2	1	H	5	7192	20,093	2,015	2,300	2,915	$J(1\div 30), L(1\div 3)$
		J	29	7170	6,927	1,424	1,515	1,780	$H(1,3\div 8,10,12), L(1\div 3)$
		L	3	7197	199,457	2,990	3,690	5,300	$H(1,3\div 8,10,12), J(1\div 30)$
	2	H	5	6630	145,800	2,015	2,300	2,915	$J(1\div 30), L(1\div 3)$
		J	29	6608	24,390	1,424	1,515	1,780	$H(1,3\div 8,10,12), L(1\div 3)$
		L	3	6635	270,562	2,990	3,690	5,300	$H(1,3\div 8,10,12), J(1\div 30)$
	3	H	5	6630	239,314	2,015	2,300	2,915	$J(1\div 30), L(1\div 3)$
		J	29	6608	37,423	1,424	1,515	1,780	$H(1,3\div 8,10,12), L(1\div 3)$
		L	3	6635	277,451	2,990	3,690	5,300	$H(1,3\div 8,10,12), J(1\div 30)$

Ввиду сложности проведенных экспериментов (наличие человеческого фактора и многофакторность самих условий проведения экспериментов) необходимо теперь провести детальный дисперсионный анализ по каждой группе экспериментов и для каждого фактора. По результатам проведенных исследований оказалось возможным сделать следующие выводы:

- 1) улучшение количественных показателей при использовании вибротактильного информационного канала может быть достигнуто по меньшей мере следующими путями:
 - а) подбор испытуемых по определенным индивидуальным свойствам;
 - б) предварительное глубокое обучение работе с использованием этого канала;
- 2) в экстремальных, но ограниченных условиях использование вибротактильного канала может компенсировать бездействие зрительного канала;
- 3) очень перспективно совместное использование двух каналов.
- 4) в целом ясно, что получение высокоточных результатов с высоким уровнем доверия, например, при $P \geq 0,995$, достигается при проведении большого количества экспериментов, что, возможно с использованием предложенных идей на математических моделях функционирования биомеханических систем.

Список литературы

1. Винарская Е.Н., Фирсов Г.И. Современные проблемы изучения механизмов полной статичности человека // Вестник научно-технического развития. - 2014. - № 8(84). - С.3-14.
2. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Взаимосвязь афферентного и эфферентного системного синтеза в изучении поструральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2008. - № 2(16). - С.115-116.
3. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Топологические аспекты афферентного и эфферентного системного синтеза в задачах изучения поструральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2009. - № 4(22). - С.44-46.
4. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Исследование процессов взаимодействия афферентного и эфферентного системного синтеза в поструральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2010. - № 2(24). - С.47-49.
5. Зилов В.Е., Судаков К.В., Эпштейн О.И. Элементы информационной биологии и медицины. - М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2000. - 248 с.
6. Kutyina D.V., Nakonechny D.G., Motailo A., Pigareva Ya.I., Kiseleva A.N., Kazantsev V.B., Gordleeva S.Yu., Kaplan A.Ya., Pimashkin A.S. Automated complex of motion control based on vibrotactile feedback for rehabilitation // Modern Tehnologies in Medicine. – 2017. - 9(4). С. 36–43.
7. Миронов В.В., Боцман О.С., Зыков А.В. и др. Обоснование системы физической подготовки курсантов высших военно-морских учебных заведений с профессионально-прикладной направленностью и экспериментальная проверка ее эффективности. – СПб.: Изд-во «Свое издательство», 2020. – 242 с.
8. Общая психодиагностика. Основы психодиагностики, немедицинской психотерапии и психологического консультирования. / Под ред. А.А.Бодалева, В.В.Столина. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. - 304 с.
9. Sheridan Th.B. Modeling Human-System Interaction: Philosophical and Methodological Considerations, with Examples. – Hoboken, New Jersey: J. Wiley and Sons, 2016. – 192 p.
10. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем. – Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.

11. Иванов-Муромский К.А., Лукьянова О.Н., Черноморец В.А. и др. Психофизиология оператора в системах человек-машина. - Киев: Наук. думка, 1980. - 344 с.
12. Готтсданкер Р. Основы психологического эксперимента. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. - 464 с.
13. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы интеллектуальной обработки информации при решении задач проектирования и идентификации динамических систем // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2011. VIII Всероссийская научно-практическая конференция. Труды. - Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2011. – С.45-51.
14. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Интерактивное структурирование пространства параметров при проектировании динамических систем // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. - № 1. – С.36-41.
15. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Численный подход к решению задачи рационального выбора параметров динамических систем // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 3(103). - С.38-53.
16. Pukelsheim F. Optimal Design of Experiments. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. - 487 p.
17. Santner Th.J., Williams B.J., Notz W.I. The Design and Analysis of Computer Experiments. - New York: Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, 2018. - 446 p.
18. Wu C.F.J., Hamada M.S. Experiments. Planning, Analysis and Optimization. - Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2021. - 733 p.
19. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1971. - 576 с.
20. Lindblom U. The Afferent Discharge Elicited by Vibrotactile Stimulation // IEEE Trans. On Man-Machine Systems. - 1970. - V.MMS-11, No.1. - P.2-5.
21. Shao Y. Tactile Sensing, Information, and Feedback via Wave Propagation. - Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – 148 p.
22. Blake D.T., Hsiao S.S., Johnson K.O. Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: The relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness // J. Neuroscience. – 1997. – Vol. 17. - P. 7480 – 7489.
23. Gescheider G.A., Bolanowski S.J., Verrillo R.T., Arpajian D.J., Ryan T.F. Vibrotactile intensity measured by three methods // J. Acoust. Soc. Am. – 1990. – Vol. 87. - P. 330 – 338.
24. Gescheider G.A., Wright J.H., Weber B.J., Barton W.G. Absolute thresholds in vibrotactile signal detection // Perception & Psychophysics. – 1971. – Vol. 10. - P. 413 – 417.
25. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Методика планирования экспериментальных исследований взаимодействия зрительного и вибротактильного каналов передачи сенсорной информации // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки. – 2002. – № 5(29). – С. 5-8.
26. Хаккер В. Инженерная психология и психология труда: Психологическая структура и регуляция различных видов трудовой деятельности. - М.: Машиностроение, 1985.– 376 с.
27. Денисов В.Г., Онищенко В.Ф. Инженерная психология в авиации и космонавтике. - М.: Машиностроение, 1972. - 316 с.
28. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. - М.: Физматгиз, 1963. – 512 с.

29. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Методика комплексного экспериментального исследования процессов восприятия и переработки вибротактильной информации человеком-оператором в экстремальных условиях // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки.– 2006. – № 11 (66). - С.9-16.
30. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Дисперсионный анализ результатов комплексного экспериментального исследования процессов восприятия и переработки вибротактильной информации человеком-оператором в экстремальных условиях // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки.– 2008. – № 6 (83). - С.26-30.

Дата поступления: 26 марта 2022 г.