

вается длина последовательности и скорость предъявления информации. Объем воспроизведения менее чувствителен к каким-либо преобразованиям информации, чем число правильных решений. Объем памяти изменяется в пределах от 56 до 99%, в то время как число правильных решений колеблется в пределах от 4 до 88%. Это, возможно, свидетельствует о том, что число правильных решений является более чувствительным индикатором процессов кратковременной памяти, чем традиционно измеряемый объем ее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Миллер. Магическое число семь плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию. Сб. «Инженерная психология». Изд-во «Прогресс», 1964.

2. В. П. Зинченко, Г. Г. Вучетич. Определение времени преобразования информации в кратковременной памяти. Сб. «Об актуальных проблемах экспериментального исследования времени реагирования», Тарту, 1969.

3. Г. К. Середа, Б. И. Снопик. Слуховая кратковременная память в условиях совмещения познавательных и мнемических задач. Вестник Харьковского университета, сер. психологическая, № 32. Проблемы психологии памяти и обучения. Изд-во ХГУ, 1970.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАТОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗАТОРА

А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко

В нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется исследованиям биологического направления, находящим различное применение в науке и технике. Многие работы посвящены изучению психической деятельности человека, а также выяснению алгоритмов, лежащих в основе функционирования биологических систем, преобразующих ту или иную информацию, поступающую извне на сенсорные входы. Проблема анализа переработки информации биологическими системами актуальна в связи с широким внедрением вычислительных, информационных, логических и управляющих систем, а также машин, обслуживающих сферу физического и умственного труда человека.

Поэтому изучение законов преобразования информации в сенсорных органах человека приобретает особый интерес. Широко освещаются успехи психологических исследований и моделирования зрительного, слухового, вкусового, термического, вибрационного анализаторов в технике, медицине и т. д. [1—5].

Данная работа посвящена обсуждению возможности использования математических моделей вибрационного анализатора для исследования вопросов его патологии, часто выступающей предвестником тяжелых заболеваний человеческого организма.

История исследования вибрационного анализатора, самого древнего представителя контактных анализаторов, началась сравнительно недавно.

Вибрационная чувствительность кожи — наиболее древний вид ощущений — долгое время физиологически не выделялась в самостоятельный вид и причислялась к тактильной, костной и другим видам чувствительности. Только в 1900 году физиологу Д. С. Двойченко уда-

лось выделить вибрационную чувствительность в самостоятельный вид и предложить термин «вибрационная» [6].

В 1904—1914 годах Минору и Трейтелю удалось установить, что у больных спинной сухоткой отсутствует параллелизм между нарушениями вибрационного чувства и другими видами чувствительности. Они подтвердили этот факт тем, что нарушение вибрационной чувствительности обнаруживалось у больного задолго до появления нарушений других видов чувствительности. В 1920 году Франк в результате множества клинических наблюдений установил, что одновременное выпадение и восстановление вибрационной и тактильной чувствительностей не является обязательным. В 1922 году Виллиамсон отмечал потерю вибрационного чувства при сохранении прочих видов чувствительности у больных диабетом и хронической глюкозурией. В 1942 году Е. Ц. Андреева-Галанина у страдающих травматическими повреждениями периферических нервов отмечала более раннее восстановление тактильной чувствительности и более позднее восстановление вибрационной.

Было установлено, что отдельные участки тела обладают различной чувствительностью к давлению и вибрации, т. е. вибрационная чувствительность не тождественна тактильной, и это подтверждается топографическим распределением вибрационной чувствительности.

Исследования Голта (1937), Вернера Лекле (1950), Вожжова (1952) [7] подтвердили, что рецепторы вибрационной чувствительности, в основном, заложены в коже и, как можно предполагать, в процессе развития организма кожный покров, как и орган слуха, образовался из эктодермы. Не исключено, что в кожном покрове сохранились образования, воспринимающие колебания путем непосредственного контакта с ним.

Таким образом, патология вибрационного анализатора, вызванная органическими заболеваниями человека, позволила установить факт существования вибрационного анализатора как самостоятельного, равноправного анализатора сенсорной системы человека. Кроме того, несмотря на свое древнейшее происхождение, природа вибрационного анализатора очень мало изучена, а поэтому проведение исследований необходимо как с точки зрения физиологии и медицины для ранней диагностики, так и с точки зрения техники для создания помехозащищенных информационных систем, свободных от акустических помех, и приборов, способных расширить возможности систем, воспринимающих зрительную и слуховую информацию. Исследования вибрационной чувствительности требуют тщательной подготовки эксперимента и тренировки испытуемого, а также выбора места, времени, возраста испытуемого, локализации восприятия информации зрительным и слуховым анализаторами.

Не все участки кожи воспринимают информацию одинаково [8]. При раздражении кожной поверхности дистальных отделов конечностей ощущение приобретает качественную окраску, в то время как при раздражении кожи лица оно становится неопределенным, теряет тоналность.

Если вибрационный раздражитель отличается малой интенсивностью, возникающее ощущение пространственно ограничено. При более высокой интенсивности раздражителя оно приобретает генерализованный характер.

Под влиянием раздражителей холода порог вибрационной чувствительности понижается. Могильницкий [9] доказал, что слуховой анализатор оказывает тормозящее действие на вибрационное чувство, и на-

оборот, если выключаются зрение и слух, вибрационная чувствительность обостряется. При полном отсутствии слуха вибрационное ощущение находилось в пределах 16—1500 *гц* (по данным Руссо). Больной без ошибки определял высоту звука в пределах полутона в интервале 25 и 488 *гц*. У слепоглухонемых (Школовский, 1939) вибрационная чувствительность связывается со сложной интерпретацией вибрационных ощущений.

В этом случае вибрация, очевидно, воспринимается как совокупность компонент осязательного восприятия речи и произносимого слова, осознаваясь и опосредствуясь в речевых общении и мышлении.

В тактильно-вибрационном восприятии речи выделяются и осознаются не только ее фонетические компоненты, но и индивидуальные качества речи [10]. В 1947 году Скороходова подробно описала восприятие музыки с помощью ощущения вибрации, передающейся от инструмента и пола. Очень низкий уровень порога вибрационных ощущений при хорошем зрении и слухе отмечается, главным образом, у больных истерией и реактивными неврозами [8].

Таким образом, наблюдается сложное взаимодействие вибрационного анализатора с другими анализаторами и их взаимное влияние. Ему, как и другим анализаторам, присущи патология и обострение чувствительности в определенных условиях.

Поэтому построение математической модели преобразования информации вибрационным анализатором, представляющим собой саморегулирующуюся систему с обратными связями, является очень важной и сложной задачей.

Цель данной работы — исследование кожного анализатора естественными вибрационными раздражениями, к которым причисляются периодические движения материальной кожи или тела, различные по амплитуде, форме и повторяемые неопределенное число раз [8].

Исследовался наиболее чувствительный участок кожи — дистальные конечности указательного пальца. При этом учитывались основные характеристики вибрационного анализатора — различительная чувствительность и дифференциальный порог различения [11—12], а также то, что порог вибрационного ощущения является функцией многих параметров

$$I = \varphi(f, A, \tau, t^{\circ}, \dots p),$$

где f — частота вибраций;

A — амплитуда вибраций;

τ — время воздействия;

t° — температура среды;

p — давление на участке тела и т. д.

Заметим, что богатый опытный материал, накопленный многими науками, занимающимися изучением и анализом сферы психической деятельности человека, используется крайне слабо. Это объясняется трудностями систематизации результатов исследований из-за наблюдающейся порой противоречивости выводов при изучении одного и того же явления, а также из-за того, что психология, невропатология, физиология, педагогика и другие в большинстве своем являются чисто описательными науками, поэтому из них трудно извлечь количественные результаты. Однако при изучении того или иного явления все же удается получить некоторую важную информацию, особенно при правильной постановке экспериментов. Поэтому для построения математической модели необходимо проверить справедливость психофизических соотношений для вибрационного анализатора. При этом вибрационную чувствительность удобно рассматривать как систему, где единственным

регистрирующим и анализирующим прибором является сознание человека.

Такую систему исследуют в физиологической целостности от входа до выхода, поэтому в дальнейшем вибрационный анализатор будет рассматриваться как кибернетическое устройство, обрабатывающее информацию. Входными сигналами такого устройства являются вибрационные раздражения, выходными — вибрационные ощущения. Задача моделирования вибрационного анализатора состоит в том, чтобы установить и математически описать закон преобразования вибрационного раздражения I (назовем его входной картиной) в вибрационное ощущение T (выходной образ), т. е. $T = f(I)$. Для решения ее выполняется ряд подготовительных работ: изучаются необходимый и достаточный наборы входных картин, способы их формирования и налаживаются установки для точного измерения параметров входных сигналов; разрабатывается методика оценки и обработки результатов.

Далее проводится сравнение действительных реакций вибрационного анализатора и реакций сформулированной математической модели для определения достоверности модели и уточнения справедливости исходных предпосылок, а также с целью извлечения дополнительной информации, дающей право на введение корректив в первоначальную гипотезу о механизме преобразования информации в вибрационном анализаторе. Опыты проверки реакций математической модели на различные типы входных сигналов осуществляются на аналоговых и цифровых вычислительных машинах, с помощью которых реализуются математические модели.

Эксперименты с участием человека проводятся на опытной экспериментальной установке, основными элементами которой являются электромагнитный датчик вибраций, широкополосный усилитель, блок управления и корректур, многофункциональный генератор, измерительная аппаратура и т. д. Установка способна формировать сигналы синусоидальной, прямоугольной и других форм в диапазоне частот 5—10 000 $гц$ [15].

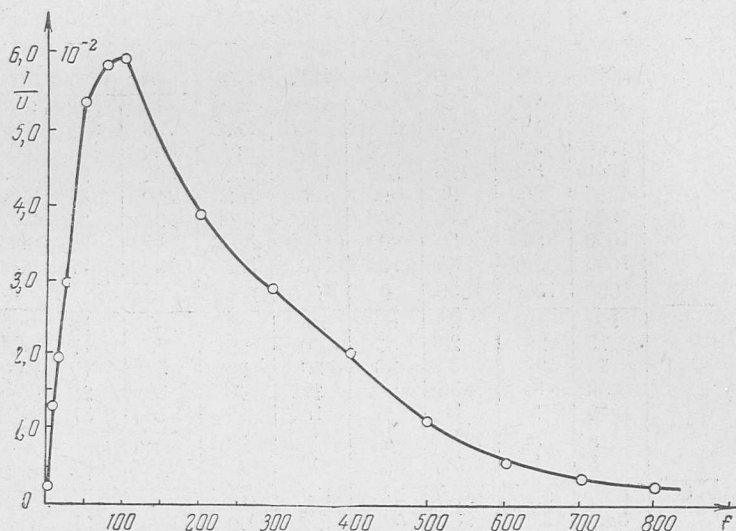
В основу методики экспериментов положены нуль-метод, принцип дихотомии, «шаг за шагом» и другие, суть которых освещена в [14, 15].

Кроме общей методики исследования, авторы стремились найти общие и различительные свойства в переработке информации между хорошо изученными зрительными, слуховыми и вибрационными анализаторами. На основе изложенной методики и предпосылок авторы провели ряд экспериментов по выяснению компонентного состава переработанной информации. Под компонентой вибрационного сигнала (вектора-сигнала) подразумеваются величины, определяющие такие параметры периодической функции-сигнала, которые являются основными носителями информации, — амплитуда, частота, фаза, форма колебаний и т. д. [16], полученные в результате разложения периодической функции в ряд Фурье.

Опыты проводились с помощью экспериментальной установки, на которой формировался сложный вибрационный сигнал определенного спектра. Испытуемый воспринимал этот сигнал при помощи фаланги пальцев на электромагнитном вибраторе. Вначале в качестве входного сигнала использовался амплитудно-модулированный сигнал, спектр которого определялся как

$$U(t) = U_0 [1 + m \sin \Omega t + \varphi_1] \sin (\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin (\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m}{2} U_0 \cos [(\omega_0 - \Omega) t + \varphi_0 - \varphi_1] - \frac{m}{2} U_0 \cos [(\omega_0 + \Omega) t + \varphi_0 + \varphi_1],$$

где ω_0 — частота модулируемого сигнала;
 φ_0 — фаза модулируемого сигнала;
 U_0 — амплитуда модулированного сигнала;
 m — глубина модуляции;
 Ω — частота модулирующего сигнала;
 φ_1 — фаза модулирующего сигнала;
 U_1 — амплитуда модулирующего сигнала.



При амплитудной модуляции спектр такого сигнала состоит из основного тона и двух обертонов, отстоящих от основного тона на величину частоты модулирующего сигнала [17]. В этом случае фазовые соотношения сигнала были постоянны. В условиях эксперимента выдерживались соотношения $\omega_0 > \Omega$. Опыт заключался в следующем. На фалангу пальцев правой руки подавался модулированный сигнал, а на палец второй руки — чистый тон синусоидального сигнала. Испытуемый посредством чистого тона старался подобрать сигнал, оцениваемый как одинаковый с модулируемым сигналом. При этом проводились замеры амплитуды и частоты чистого тона, которые по необходимости регулировались.

Результаты экспериментов с десятью испытуемыми фиксировались в протоколах. Опыты показали, что вибрационный анализатор выделяет из спектра сигнал только той амплитуды и частоты, который попадает в область наибольшей чувствительности. При этом выделялась лишь одна гармоника спектра, амплитуда и частота которой совпадали с расчетной с точностью до 1,5%. Данные опыта приведены в таблице и на рисунке.

Как видно из таблицы, опытные данные можно разделить на три части.

1. В первой части опыта анализатор выделял обертона разностной частоты, причем замеры производились по пороговой величине амплитуды ощущаемого сигнала.

2. Во второй части опыта кожный анализатор выделял основной тон сигнала.

3. В третьей части опыта анализатор выделял обертона суммарной частоты.

Графа «Не ощущалось» может быть заполнена с увеличением мощности сигнала.

Номер опыта	$\frac{1}{2\pi} \omega_0$, гц	$\frac{1}{2\pi} \Omega$, гц	U_0 , мв	Расчетные данные			Опытные данные		
				$\frac{\Omega}{\omega_0} -$	$\frac{\omega_0}{\Omega}$	$\frac{\Omega}{\omega_0} +$	f , гц	U_m , мв	$\frac{1}{U_m}$
				$-\frac{(\omega_0)}{\Omega}$	$-\frac{\omega_0}{\Omega}$	$-\frac{(\omega_0)}{\Omega}$			
1	1000	100	1000	900	1000	1100	Не ощущалось		
	1000	200	750	800	1000	1200	810	382	0,0026
	1000	300	600	700	1000	1300	705	303	0,0032
	1000	400	400	600	1000	1400	604	195	0,0051
	1000	500	190	500	1000	1500	502	97	0,0059
	1000	600	90	400	1000	1600	400	45	0,0222
	1000	700	70	300	1000	1700	298	34	0,0295
	1000	800	50	200	1000	1800	201	26	0,0385
	1000	900	35	100	1000	1900	100	17	0,059
	1000	1000	1000	0	1000	2000	Биения		
2	100	40	20	60	100	140	100	18	0,055
	70	20	20	50	70	90	70	17	0,059
	50	20	20	30	50	70	50	19	0,053
	30	10	30	20	30	40	30	28	0,035
	10	5	50	5	10	15	10	51	0,0195
	5	5	1000	0	5	10	Биения		
	5	1	75	4	5	6	5	73	0,0135
3	0,8	0,1	1000	0,7	0,8	0,9	—	—	—
	0,8	0,2	900	0,6	0,8	1,0	1,0	551	0,0018
	0,8	0,7	700	0,1	0,8	1,5	1,6	336	—
	0,8	0,8	1000	0	0,8	1,6	Биения		
	0,8	0,8	1000	0	0,8	1,6	Биения		

Графы «Биения» не давали четких и ясных ощущений в определении частоты и амплитуды сигнала. В дальнейшем под биениями будем понимать интерференционное явление, смысл которого — в периодическом изменении амплитуды фазы и частоты результирующего колебания, состоящего из двух простых синусоидальных колебаний с неравными частотами.

В связи с этим полезно провести дополнительные опыты для выяснения того, в каких пределах изменение фазовых соотношений влияет на восприятие амплитуды и частоты. Эксперимент показывает, что вибрационный анализатор ведет себя как настроенный резонатор. При этом четко фиксируются частота и амплитуда сигнала, величина которого превышает порог ощущения. Квазипостоянная разность фаз сигнала не влияет на качественную величину ощущения. Зависимость $\varphi = \frac{1}{U(f)}$, полученная в результате опыта, по своему характеру совпадает с пороговой кривой анализатора.

Цель второго эксперимента — определение спектральной полосы анализатора и влияния фазы на качественную оценку информации.

Опыт проводится по той же методике, но входным сигналом было избрано бигармоническое колебание, спектр которого определяется как

$$U(t) = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

При $\omega_2 > \omega_0$ общая амплитуда сигнала имеет вид

$$U_m = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \varphi_1]},$$

а фаза —

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2}{U_1 \cos \varphi_1 + U_2 \cos \varphi_2} \approx \operatorname{const.}$$

Эксперимент показал, что ощущения определялись только амплитудой и частотой основного тока. Основным тоном считалось гармоническое колебание, амплитуда которого больше. При этом фазовые соотношения не влияли на качество ощущения. Если амплитуды слагаемых колебаний были равны, испытуемые определяли ощущения по результирующей амплитуде, а частоту — как среднюю частоту колебания, т. е. при $U_1 = U_2$ тон постоянной средней частоты и амплитуда определялись равными $2U$.

Вторая половина опыта проводилась для случая, когда частота одного из слагаемых колебаний незначительно отличается от другого (биения). Для таких колебаний

$$U(t) = U_1 \cos(\omega t + \varphi) \text{ и } U(t) = U_2 \cos(\omega + \Delta\omega)t,$$

а суммарное колебание

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t + \psi),$$

где

$$U_0 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)},$$

$$\Psi = \operatorname{arctg} \frac{U_1 \sin \varphi + U_2 \sin \Delta\omega t}{U_1 \cos \varphi + U_2 \cos \Delta\omega t},$$

т. е. амплитуда U_0 и фазовый угол ψ не постоянны, а периодически изменяются во времени. Частота колебания

$$\Omega = \frac{d}{dt}(\omega t + \psi) = \omega + \delta\omega$$

в общем случае зависит от скорости изменения фазы

$$\delta\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{U_2^2 + U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)}{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)} \Delta\omega.$$

Таким образом, скорость изменения фазы влияет на количество вершин результирующего колебания [16]. Опыты с различным соотношением амплитуд, частот и фаз в спектре показали, что испытуемые при $\Delta\omega \ll \omega$ ощущали частоту колебаний той гармоники, амплитуда которой выше. Для случая $\Delta\omega \approx \omega$ испытуемые отчетливо могли выделить два типа колебаний: гармонику колебания, амплитуда которого наибольшая, и низкочастотную составляющую спектра, которая определялась скоростью изменения фазы.

Как показали расчеты, если $\frac{d\psi}{dt} > 1$ *гц/сек*, то низкочастотная составляющая спектра ощущалась. Эти факты свидетельствуют о том, что кожный анализатор помимо амплитудно-частотного спектра воспринимает изменение фазы, которая ощущается как низкочастотное изменение амплитуды суммарного сигнала.

В связи с этим возникла необходимость проведения новых экспериментов определения влияния фазы на кожные ощущения. Методика опытов оставалась прежней, но испытуемые сравнивали два сигнала, состоящие из сумм двух гармоник, причем соответствующие гармоники обоих сигналов имели одинаковую амплитуду и частоту. Изменением фазы достигалось абсолютное равенство обоих сигналов. Испытуемые фиксировали субъективное равенство сигналов при любом соотношении

фаз. Вторая часть опыта проводилась при абсолютном равенстве амплитуды частот всех гармоник суммарного сигнала, изменялась только фаза одного из сигналов. Это вызывало качественное субъективное неравенство сигналов, особенно ощущавшееся при разности фаз $\frac{\pi}{2}$ и более. Такие же ощущения испытываемые наблюдали и при соотношении амплитуд $\frac{U_2}{U_1} = 0,7$ и более в суммарном сигнале, когда постановка опыта была аналогичной.

Итак, результаты опытов показали следующее:

1) вибрационный анализатор — хороший временной (частотный) анализатор, не зависящий от квазипостоянного изменения фазы;

2) чувство вибраций однокомпонентно и связано с выделением основного тона интенсивности вибраций, где $I(t)$ — зависимая переменная, а $f(t)$ — независимая переменная.

Однокомпонентность чувства вибраций находится в определенном соотношении информационных составляющих входного сигнала: $\frac{U_2}{U_1} < 0,7$ при $f_1 = f_2$ и $\frac{d\psi}{dt} < 1$ рад/сек. Указанные границы, определяющие этот диапазон характеристик входного сигнала, назовем линейным диапазоном.

На основании этих данных проводились более сложные эксперименты, которые дали возможность получить математические модели вибрационного анализатора: модель адаптации вибрационного анализатора, модель инерции вибрационного анализатора, модель однородных вибрационных ощущений и т. д. [18—19].

Можно полагать, что модели переработки информации, отражающие функционирование кожного анализатора, будут полезны при определении патологии вибрационного анализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Стивенс. Экспериментальная психология. Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Сб. «Теория связи в сенсорных системах». Изд-во «Мир», 1964.
3. Ю. А. Макаренко. Органы чувств и автоматы. Изд-во «Знание», 1966.
4. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко. О задаче математического моделирования зрения человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
5. Bekesy. Synchroism of nerve discharges and their demultiplication in pitch perception on the skin and hearing. J. Acoust. Soc. Amer., 1959, № 31.
6. Д. С. Двойченко. К вопросу о костной чувствительности. «Медицинское обозрение», 1900, № 54.
7. А. И. Вожжова. Вибрационная чувствительность в профпатологии. Труды ВММА, 1952, № 41.
8. Е. Ц. Андреева-Галанина. Вибрация и ее значение в гигиене труда. Медгиз, 1956.
9. М. С. Могильницкий. Влияние вибрационных раздражителей на звуковую травму. Сб. трудов, посв. проф. Левинц, М., 1935.
10. Л. И. Переслени. Исследование восприятия речи через кожный анализатор. «Спец. школа», 1967, № 3.
11. Использование кожи в качестве канала передачи информации оператору. «Бионика вчера и сегодня (по материалам зарубежной печати)». Изд-во «Знание», 1967.
12. М. Ф. Ломов. Человек и техника. Изд-во «Сов. радио», 1966.
13. А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко. Разработка прибора для исследования тактильной чувствительности человека. Труды II Всесоюзного традиционного научно-техн. семинара, М., 1968.
14. Г. Ф. Дюбко. Математическая модель статического преобразования интенсивности звука и громкости. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
15. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Г. Ф. Дюбко. Моделирование статики адаптации слуха. «Биофизика», 1968, № 4.
16. Ю. И. Иорш. Виброметрия. Гостехиздат, 1963.