

---

---

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

---

---

УДК 621.37:004.891.3:616-07

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*М.Л. КОЧИНА, А.Г. ФИРСОВ*

---

В работе описан прибор, позволяющий исследовать критическую частоту слияния световых мельканий, время простой и сложной сенсомоторных реакций, силу, динамичность, функциональную подвижность нервных процессов. Прибор может применяться в профотборе, эргономике и клинической практике, позволяет автоматизировать процесс исследования психофизиологического состояния человека.

*Ключевые слова:* критическая частота слияния световых мельканий, время сенсомоторной реакции, сила нервных процессов, автоматизированный комплекс, профотбор.

### ВВЕДЕНИЕ

С 2005 г. в Украине проходит внедрение Системы профессионального психофизиологического отбора работников для выполнения работ повышенной опасности. Отбор осуществляется путем проведения психофизиологической экспертизы лица на его пригодность по психофизиологическим качествам к выполнению работ повышенной опасности. Обследование и испытание тестовыми нагрузками позволяет быстро и объективно «измерять» сравнительно большое число психофизиологических свойств, выявить тонкую структуру индивидуальных особенностей личности, которую другими методиками можно определить лишь в процессе длительных специально организованных наблюдений, а также изучения работающих лиц в процессе деятельности. Для проведения психофизиологической экспертизы необходима разработка новых методов регистрации и обработки показателей, характеризующих функциональное состояние организма человека. Актуальными являются задачи разработки и изготовления современной аппаратуры для проведения психофизиологической экспертизы, подготовки специалистов для эксплуатации и модернизации автоматизированных диагностических комплексов.

К числу методов, позволяющих быстро оценить многие психофизиологические качества человека, относятся исследование критической частоты слияния световых мельканий (КЧСМ), времени сенсомоторной реакции (СР) (характеризующего скорость реакции на световой и звуковой раздражитель, скорость зрительно-моторной реакции), времени темновой адаптации.

До недавнего времени у специалистов на вооружении был ряд программных продуктов, позволяющих производить оценку КЧСМ и СР при помощи ЭВМ и монитора. Но со временем появилась серьезная проблема, так как большинство современных ЭВМ работают под управлением

многозадачных операционных систем не жесткого реального времени, соответственно время реакции стало невозможно однозначно оценивать, используя эти программные продукты [1]. Выходом из положения является применение операционных систем жесткого реального времени или специализированных приборов с аппаратным отсчетом времени. Первый способ мало пригоден для медико-биологических исследований ввиду сложности реализации и дороговизны. Применение специализированных приборов, позволяющих проводить исследования по определению значений КЧСМ и времени СР, является предпочтительным, так как не требует узкоспециализированных систем, а использует распространенные аппаратно-программные платформы. Дополнительным аргументом в пользу таких приборов является то, что их легче сертифицировать и их цена на порядки ниже, чем ЭВМ, что позволяет прогнозировать их более широкое внедрение в практику.

Цвет объекта является результатом обработки электрических сигналов от четырех популяций приемников электромагнитного излучения – фоторецепторов («красные» колбочки, ( $\lambda_{\max} = 560 \text{ нм}$ ); «зеленые» колбочки, ( $\lambda_{\max} = 530 \text{ нм}$ ); «синие» колбочки, ( $\lambda_{\max} = 420 \text{ нм}$ ); палочки (от 345 до 575 нм) в системе цветоопponentных рецептивных полей (красно-зеленые, сине-желтые, черно-белые). Таким образом, цветовой образ всегда является реконструкцией спектральных характеристик зрительной сцены по разностным сигналам в сложной нейронной сети [2]. Поэтому определение КЧСМ будет более информативно при использовании красных, зеленых, синих и желтых световых стимулов, позволяющим работать в красно-зеленых и сине-желтых полях.

Относительно нормальных показателей КЧСМ в современной литературе имеются противоречивые данные. Автором установлено [2], что для центральной зоны сетчатки ( $5^\circ$ ) КЧСМ

составляет 40–45 Гц, для парацентральной зоны ( $10^\circ$ – $20^\circ$ ) – возрастает до 55 Гц и для крайней периферии – снижается до 35–40 Гц. По данным других авторов КЧСМ для крайней периферии составляет 60 Гц и выше. Вследствие отсутствия стандартизации метода и аппаратуры для определения КЧСМ нормативные данные в разных лабораториях существенно отличаются. В традиционном варианте использования метода предъявляется один стимул центральной локализации, воспринимаемый главным образом макулярной областью сетчатки.

Целью данной работы является разработка портативного многофункционального устройства для психофизиологических исследований с аппаратным отсчетом времени и простой интеграцией в комплекс.

## 1. МЕТОДЫ

Наиболее совершенным способом оценки КЧСМ считается способ Н. М. Пейсахова, по которому КЧСМ определяется дважды – при увеличении частоты световых мельканий от минимального значения, принятого равным 32 Гц, и при ее уменьшении от максимального значения, принятого равным 72 Гц, до критического [3]. Истинное значение КЧСМ вычисляется как среднеарифметическое результатов двух полученных значений. Существует и упрощенная процедура измерения, когда значение КЧСМ определяется при нарастающей частоты.

Управление частотой световых мельканий при ручном изменении частоты и фиксацию значения КЧСМ нужно позволить выполнять испытуемому, что может уменьшить систематическую составляющую погрешности измерений. Случайная составляющая погрешности измерений уменьшается при проведении перед измерениями предварительного обучения определению КЧСМ [3]. То же самое следует сделать и при проведении измерения времени СР.

При измерении времени СР используется классификация и рекомендации ряда авторов [4–6]. Для измерения простой зрительно-моторной реакции используются световые стимулы разного цвета. Контрастность фона и стимула должна быть большой, поэтому светостимул размещен в защитных непрозрачных очках. Длительность экспозиции стимула – 0,2 с. Испытуемому дается инструкция, как можно быстрее реагировать на появление стимула нажатием определенной клавиши, на которой испытуемый держит палец. В процессе эксперимента регистрируется время реакции испытуемого в серии из  $n$  измерений.

Необходимо учитывать, что в процессе эксперимента могут появляться как неправдоподобно длительные, так и очень быстрые реакции. Наличие таких реакций может сильно «сместить» результат оценки уровня активации организма. Исключение «выскакивающих» значений может быть проведено с помощью критерия Шовене [7].

Для этого рассчитывают среднее арифметическое ( $M$ ) и среднее квадратичное отклонение ( $\delta$ ) полученного ряда латентных периодов реакций:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n},$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M)^2}{n},$$

где  $X_i$  – текущее значение латентного периода простой зрительно-моторной реакции;  $n$  – количество измерений реакции;  $i$  – порядковый номер реакции.

Затем вычисляют характеристику  $t$ :

$$t = \frac{X_i - M}{\delta}.$$

Полученные значения стандартизованного отклонения каждой из реакции от средней реакции сравнивают с табличным значением критерия Шовене. Например, для  $n=10$   $t(st) = 2, 3$ . Все значения реакций, для которых  $t \geq t(st)$  из последующей выборки исключаются. Если число исключенных значений реакций больше нуля, то количество испытаний увеличивается на это число. Затем опять проводится проверка на наличие «выскакивающих» значений. Эта операция продлевается до тех пор, пока число исключенных значений не будет равным нулю. Затем рассчитываются показатели проведенных испытаний: среднее значение латентного периода простой зрительно-моторной реакции, среднее квадратичное отклонение означенной реакции, процент «выскакивающих» значений реакции, вычисленный исходя из всей группы проведенных испытаний.

Для определения времени сложной сенсомоторной реакции используется такая инструкция: испытуемому необходимо как можно быстрее нажимать установленную клавишу при появлении стимула строго определенного цвета. На появление стимула другого цвета не реагировать. Задается количество раздражителей, на которые реакция необходима, количество стимулов другого цвета, на которые реакция должна отсутствовать, среднее время межстимульного интервала и среднее квадратичное отклонение межстимульного интервала (для определения межстимульного интервала используется датчик псевдослучайных чисел с нормальным распределением).

С помощью генератора псевдослучайных чисел равновероятно выбирается и генерируется стимул одного из предусмотренных цветов. Длительность экспозиции стимула – 0,2 с. Измеряется время реакции испытуемого. Диагностируется возможная ошибка: ошибка пропуска, ошибка реагирования на другой цвет. Запоминается последовательность выводимых цветов. Проводится проверка на наличие «выскакивающих» реакций.

В случае наличия таковых проводятся дополнительные исследования (аналогично простой СР). Вычисляется процент неадекватных «выскакивающих» реакций относительно общего числа возбуждающих стимулов.

Методика измерения функциональной подвижности нервных процессов (ФНП) заключается в следующем: в течение заданного времени Т испытуемому в случайном порядке предъявляются задачи на распознавание цветов (цветных стимулов заданного размера и яркости). Требуется как можно быстрее определить цвет выведенного стимула и, в случае, если это цвета Ц1 или Ц2 нажать определенную в инструкции соответствующую клавишу, а в случае появления Ц3 – не производить никаких действий с клавиатурой прибора. При проведении испытания следует реализовать режим работы «с обратной связью», т. е. в процессе выполнения задания постоянно осуществлять проверку качества работы по следующему алгоритму.

Экспозиция первой предъявляемой задачи 1 с, а время высвечивания каждой последующей задачи  $t(n)$  зависит от продуктивности решения предыдущей задачи  $t(n-1)$  и определяется правилом:

$$t(n) = \begin{cases} (1 - dt) \cdot t(n-1) & \text{своевременно} \\ (1 + dt) \cdot t(n-1) & \text{несвоевременно} \end{cases}$$

где  $t(n)$  – текущая экспозиция раздражителя;  $t(n-1)$  – предыдущая экспозиция раздражителя;  $dt$  – доля изменения длительности экспозиции раздражителя;  $n$  – порядковый номер раздражителя.

Своевременным решение считалось тогда, когда испытуемый нажимал (или не нажимал) адекватную клавишу за период  $t(n-1) + 0,1$  с после появления задачи. В противном случае решение задачи считалось несвоевременным. Длительность интервала между сигналами – 0,2 с. После проведения испытания определяется минимальная за все время эксперимента экспозиция раздражителя, который и считается оценкой ФНП.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Ввиду неоднородности и сложности методик КЧСМ и время СР должны определяться отдельными узлами: генератором, перестраиваемым испытуемым, и таймером, запускаемым и останавливаемым им же. Так же ряд методик требует подсчет числа ошибок. Генератор, частотмер, таймер и счетчики вместе с устройством управления входят в состав микроконтроллера

(МК), который является основным элементом схемы прибора. Производственный разброс параметров светодиодов, используемых в качестве источников светостимулов, обуславливает наличие электронной регулировки яркости. Оптимально в таком случае использовать связку широко – импульсный модулятор (ШИМ) – фильтр – усилитель, тем более, что большинство МК уже имеют в своем составе аппаратные ШИМ. Для связи с компьютером следует использовать интерфейс USB, так как традиционные для подобных приборов интерфейсы LPT и COM почти не встречаются в современных компьютерах, а тем более в ноутбуках. Для гибкости решения применен преобразователь интерфейсов USB и последовательного интерфейса МК.

Структурная схема прибора показана на рис. 1.

Прибор состоит из двух светостимуляторов, расположенных в оправе очков, в состав каждого из них входит 4 светодиода СД 1-4, СД 5-8 - для подачи светостимулов разного цвета. Коммутатор К обеспечивает выбор соответствующего цвета. Фильтр-усилитель Ф-У служит для согласования уровней мощности генератора и светодиодов, а так же для фильтрации ШИМ сигнала питания светодиодов. Генератор Г служит для генерирования сигнала с частотой стимулов. Т – таймер, служит для формирования последовательности импульсов для измерения времени СР. С – секундомер – для измерения времени сенсомоторной реакции, СО – счетчик ошибок при измерениях. ПК – компьютер для регистрации результатов измерения и управления, ПИ – преобразователь сигналов интерфейса USART микроконтроллера и USB персонального компьютера, Кл – кнопки ответа испытуемого, с помощью которых он фиксирует значение частоты и появление стимула. Кнопки выведены на верхнюю часть пульта, ко-

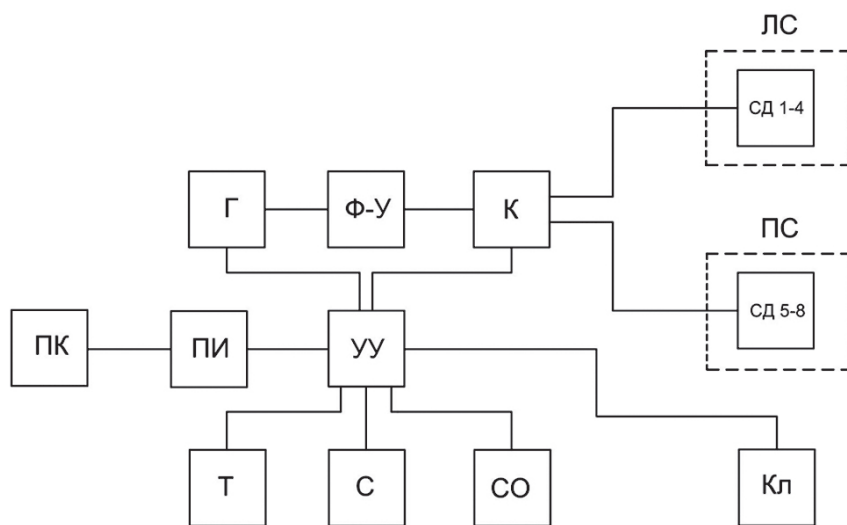


Рис. 1. Структурная схема прибора:

ЛС и ПС – светостимуляторы левого и правого глаз; СД 1-8 – светодиоды; К – коммутатор; Ф-У – фильтр-усилитель; Г – генератор; Т – таймер; С – секундомер; СО – счетчик ошибок; УУ – устройство управления; ПК – компьютер; ПИ – преобразователь интерфейсов, Кл – кнопки ответа испытуемого.

торый является одновременно корпусом для прибора, в котором смонтированы все узлы.

Светостимуляция, для исключения влияния нежелательной посторонней засветки, осуществляется с помощью очков (типа защитных) с четырьмя светодиодами и световодами, расположенными напротив каждого глаза в центральной зоне. Диаметр светового стимула – 1,8 мм, зона засвета сетчатки для исследования макулярной зоны – не более 6°, дискретность изменения частоты – 0,1 Гц; диапазон определения частоты 32...72 Гц, длительность светового импульса – 10 мс. Такая длительность стимула была выбрана в соответствии с принятой практикой регистрации локальной электроретинограммы (Л-ЭРГ) [2].

Как правило, в практике рефлексометрии исследуются реакции не на одиночные раздражители, а на их серии, где сигналы следуют друг за другом. Диапазон измерения времени реакции от 1 мс до 9 с, дискретность измерения 1 мс, количество кнопок ответа испытуемого – 2.

В качестве основного выбран микроконтроллер семейства Mega – ATMEGA8, имеющий FLASH- память программ объемом 8 Кбайт, ОЗУ объемом 1 Кбайт, два 8-разрядных таймера/счетчика, один 16-разрядный таймер/счетчик (с возможностью работы в режиме 2-х канального генератора сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), полнодуплексный универсальный синхронный/ асинхронный приемопередатчик (USART), максимальным числом линий ввода/вывода равным 23 [8]. На сегодня он обладает максимальным соотношением функциональность/цена.

Функциональная схема прибора показана на рис. 2

Микроконтроллер ATmega8 в своем составе имеет 16-разрядный таймер-счетчик, который может быть сконфигурирован как двухканальный 10-разрядный ШИМ. Сигнал с выхода модулятора может быть получен на выводах OC1A и

OC1B. Сигнал ШИМ подвергается фильтрации и усилению в фильтре, построенном на операционном усилителе LM358, и подается на управляющий вход интегрального регулятора напряжения LM317. С выхода регулятора напряжение подается на аноды светодиодов, расположенных в очках. Таким образом, в приборе реализована возможность электронной регулировки яркости свечения светодиодов (источников светостимулов). Это позволяет менять вышедшие из строя очки со светодиодами, проводить калибровку яркости светодиодов, для обеспечения повторяемости результатов измерения. Для этого в программе для ЭВМ предусмотрен конфигуратор.

Для генерирования импульсов с изменяемой частотой (используется для определения КЧСМ) и импульсов с регулируемой длительностью и паузой в последовательности (для определения времени СР) служит второй таймер-счетчик. В зависимости от команд, принятых с ПК, этот таймер-счетчик изменяет состояние выводов МК PC0...PC5, которые подключены к коммутатору UNL2003. Коммутатор через токоограничивающие резисторы подключает катоды светодиодов, расположенных в очках к минусу источника питания. Так обеспечивается выбор требуемого цвета при проведении измерений. Дополнительно от выходов регуляторов напряжения, через делитель поступает напряжение на наушники и коммутируется левый или правый канал при исследовании слухомоторных реакций.

Поскольку выбранный микроконтроллер не имеет аппаратного контроллера USB, то для преобразования сигналов последовательного приемопередатчика (USART) МК ATmega8 используется дополнительный МК ATtiny2313. На нем реализован программный преобразователь протокола обмена данными по шине USB. При подключении прибора к ПК и установке стандартного драйвера он определяется как виртуальный COM-порт, с которым удобно работать.

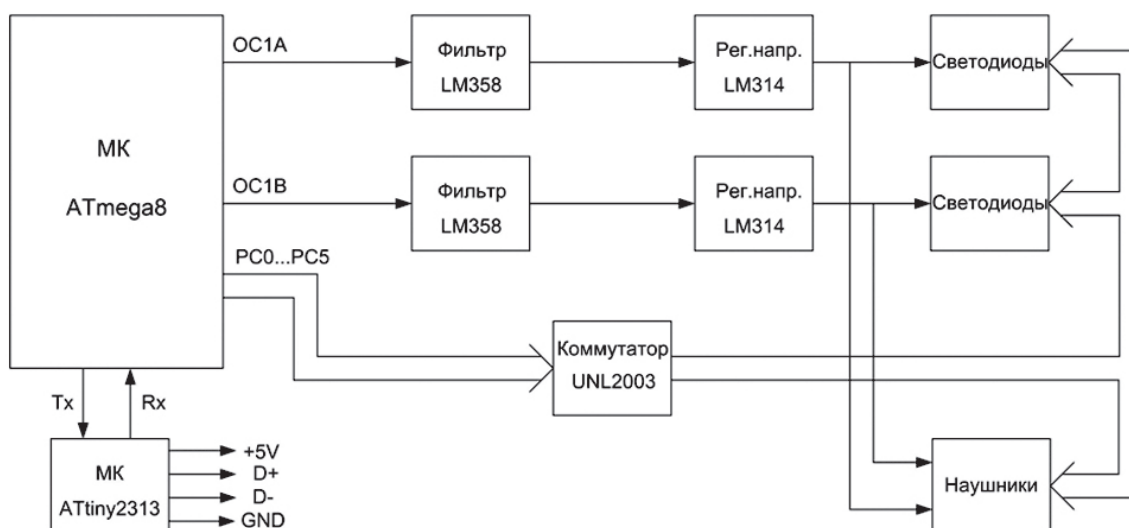


Рис. 2. Функциональная схема прибора

Питание всего прибора осуществляется от шины USB, ток потребления не превышает 150 мА, что гораздо больше возможностей шины (500 мА). Это позволяет обойтись без дополнительных стабилизаторов напряжения питания.

Все временные интервалы в МК генерируются путем соответствующего деления частоты кварцевого генератора, что обеспечивает гарантировано малую инструментальную погрешность. В приборе использован внешний кварцевый резонатор на частоту 16 МГц.

При разработке прибора много внимания уделялось совместимости с ПК. Связь с ПК происходит через виртуальный COM-порт, драйвера, на который имеются под операционные системы семейства Windows, Linux, MacOS. Кроме того, по требованию можно изготовить версии прибора для компьютеров без шины USB, а так же беспроводными адаптерами. Гибкость решения позволяет интегрировать прибор в уже существующие системы путем несложной доработки самой системы.

Протокол обмена с прибором чрезвычайно прост. Прибор и ПК обмениваются информацией при помощи коротких сообщений – дейтаграмм. Сообщение состоит из последовательности байт: 8 байт для измерения КЧСМ, 13 байт для измерения времени СР и 8 байт для калибровки яркости. В конце каждого сообщения идет контрольная сумма байт сообщения (CRC). Если происходит искажение информации, то сообщение повторяется. В сообщении указывается методика, яркость светодиодов, цвет и используемый канал, увеличение или уменьшение частоты, длительность светового стимула, время между стимулами. Ответное сообщение содержит информацию о частоте КЧСМ или времени нажатия на клавишу и номер клавиши. Все методики формируются программно на уровне приложения в ЭВМ, что дает возможность гибко изменять и дополнять методики, реализуемые комплексом.

Управление прибором осуществляется программой «Исследователь», предназначенной для IBM-совместимых компьютеров с операционной системой Windows 2000/XP/Vista. Приложение написано с использованием Microsoft®.NET Framework 3.5 на языке C#, что позволяет при необходимости портировать его в другие ОС (например, Linux, используя Mono). Справочная система программы позволяет быстро получить необходимые сведения о работе программы и методике проведения исследования. Разработанная программа обеспечивает управление и ведение базы данных. В базе данных сведены личные данные испытуемого и результаты проведенных исследований. Результаты измерения нельзя редактировать, можно только повторить измерения, при этом в базе появляется новая запись об этом. Это сделано для того, чтобы в процессе исследования исключить возможность умышленного ис-

кажения результатов. База данных совместима с форматом книг Microsoft Excel, дополнительно имеется возможность экспорта/импорта данных с этим приложением, а так же в текстовый формат. Дополнительно программа управления позволяет создавать и редактировать профили исследования (в формате XML), в которых можно указать число испытаний, методику, число обучающих итераций. Это дает возможность упростить и ускорить процесс исследования, а так же использовать в процессе автоматического измерения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прибор позволяет автоматизировать процесс исследования психофизиологического состояния человека по ряду показателей, а так же сократить количество персонала, требуемого для проведения исследований. Вид тестовых заданий и форма представления результатов исследований может изменяться в зависимости от поставленных задач (профессиональный отбор, психофизиологическая экспертиза, оценка текущего функционального состояния человека).

Предлагаемый прибор имеет ряд преимуществ перед аналогами. Он позволяет наряду с измерением КЧСМ четырех цветов (в существующих аналогах их не более трех), проводить исследования времени сенсомоторной реакции на световые и звуковые стимулы. Важной особенностью прибора является возможность фиксации количества ошибок испытуемого при проведении измерений. Количество ошибок, допускаемое испытуемым при осуществлении методик, также является диагностическим показателем, характеризующим функциональное состояние человека и степень его утомления. Прибор может питаться от порта USB ПК, что позволяет использовать его с портативным компьютером типа notebook.

При разработке прибора был исследован вопрос программной зависимости компьютерных методик определения КЧСМ и времени СР, заключающийся в том, что в многозадачных операционных системах не жесткого реального времени длительность временных интервалов однозначно определить сложно. Поэтому для обеспечения требуемой независимости и повторяемости результатов исследований используется не программный, аппаратный способ измерения времени.

Описанные методики являются субъективными, хотя в практике применяются очень часто. Для объективизации результатов психофизиологических исследований прибор планируется дополнить объективными методиками исследования, такими как электромиография и омегаметрия. Эти методики планируется объединить в едином аппаратно – программном комплексе, позволяющем комплексно решать задачи профотбора.

**Литература.**

- [1] *Таненбаум Э., Вудхалл А.* Операционные системы: разработка и реализация. / Э.Таненбаум, А.Вудхалл. — СПб.: Питер, 2006. — 576 с: ил.
- [2] *Голубцов К.В.* Мелькающий свет в диагностике и лечении патологических процессов зрительной системы человека. / К.В. Голубцов, И.Г. Куман, Т.С. Хейло и др., // Информационные процессы. — 2003. Т.3, № 2. — С. 114-122.
- [3] *Роженцов В. В.* Исследование критической частоты слияния мельканий методом последовательных приближений. / В. В. Роженцов, Т. А. Корнюшина, А. А. Фейгин // Физиология человека. — 2006, Т. 32, № 5. — С. 52-55.
- [4] *Дорошенко В.А. и др.* Методы исследования в психофизиологии: Учебн. пособие / В.А. Дорошенко, И.Е. Кануников, А.Г. Смирнов и др. — СПб., 1994. — 143с.: ил.
- [5] *Макаренко Н.В.* Критическая частота световых мельканий и переделка двигательных навыков // Физиология человека. — 1995. — Т. 21. — № 3. — С. 13-17.
- [6] *Макаренко Н.В.* Методика проведения обстежень та оцінки індивідуальних нейродинамічних властивостей вищої нервової діяльності людини / Н.В. Макаренко //Фізіологічний журнал. — 1999. — Т.45, №4. — С. 125—131.
- [7] *Тейлор Дж.* Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. Л.Г. Деденко. — М.: Мир, 1985. — 272с., ил.
- [8] *Евстифеев А.В.* Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. — 592 с: ил.

Поступила в редколлегию 29.04.2010

**Кочина Марина Леонидовна**, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств ХНУРЭ, ведущий научный сотрудник Харьковского национального медицинского университета. Область научных интересов: исследование и моделирование механизмов взаимодействия электромагнитного излучения с биологическими объектами, медицинская и биологическая кибернетика.



**Фирсов Алексей Геннадиевич**, магистр, выпускник ХНУРЭ, аспирант кафедры радиоэлектронных устройств ХНУРЭ. Область научных интересов: проблемы обработки и представления сигналов биологического происхождения, цифровая обработка сигналов различной природы.

УДК 621.37:004.891.3:616-07

**Багатофункціональний прилад для проведення психофізіологічних досліджень** / М.Л. Кочина, О.Г. Фірсов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2010. Том 9. № 2. — С. 260-265.

У статті був описаний прилад, що дозволяє досліджувати критичну частоту злиття світлових мелькань, час простої і складної сенсомоторних реакцій, силу, динамічність, функціональну рухливість нервових процесів. Прилад може застосовуватися в профвідборі, ергономіці та клінічній практиці, дозволяє автоматизувати процес дослідження психофізіологічного стану людини.

*Ключові слова:* критична частота злиття світлових мелькань, час сенсомоторної реакції, сила нервових процесів, автоматизований комплекс, профвідбір.

Іл.02. Бібліогр.: 08 найм.

UDC 621.37:004.891.3:616-07

**Multifunctional device for psychophysiological research** / M.L. Kochina, A.G. Firsov // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2010. Vol. 9. № 2. — P. 260-265.

The paper describes a multifunctional device that allows to measure the critical frequency of confluence of blinkings, simple and complicated sensomotor reaction time, functional mobility of nervous processes. The device can be used in occupational selection, ergonomics and clinical practice as well as it allows to automatize the process of researching man's psychophysiological state.

*Key words:* critical frequency of confluence of blinkings, sensomotor reaction time, functional mobility of nervous processes, computer-aided complex, occupational selection.

Fig. 02. Ref.: 08 items