

**И.Б. Исупов, В.В. Саманов**

Волгоградский государственный  
педагогический университет

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭРГОМЕТР

*Математика, естественные науки и методика их преподавания*

Метод эргографии нашел широкое применение при оценке физической работоспособности человека. В большинстве случаев принцип действия эргографа заключается в том, что обследуемый перемещает груз известной массы на определенное расстояние, противодействуя внешней силе, действующей на груз. Одной из разновидностей метода является пальцевая эргография Моссо, позволяющая определять затраты энергии (внешнюю работу) мышц-сгибателей пальцев — работу, направленную на преодоление силы тяжести.

Стандартный эргограф Моссо представляет собой механическую систему с несколькими неподвижными блоками-шкивами, через которые перекинут тросик. На одном конце тросика закреплен груз, на другом размещена ременная петля, которую надевают на среднюю фалангу указательного пальца обследуемого. Испытуемый, ритмически сгибая и разгибая палец, осуществляет циклическое перемещение груза в вертикальном направлении. С тросиком кинематически связано пишущее устройство, обеспечивающее регистрацию на бумажном носителе квазиволнообразной кривой, имеющей амплитуду, равную высоте подъема груза за один цикл (запись эргограммы).

В качестве лентопротяжного механизма эргографа используется лабораторный кимограф, на барабане которого, приводимом во вращение электродвигателем с редуктором, укрепляют диаграммную бумагу. Реже для перемещения бумажного носителя применяют мускульную энергию самого испытуемого: с помощью системы шестерен и храпового механизма, во время разгибания пальца бумажная лента протергивается на 1,0 — 1,5 мм и таким образом осуществляется развернутая запись эргограммы.

Работу по перемещению груза вычисляют согласно формуле

$$A = mghn,$$

где  $A$  — работа (Дж);  $m$  — масса груза (кг);  $g$  — ускорение свободного падения (в физиологии, биомеханике, спортивной медицине округляют до  $10 \text{ м/с}^2$ );  $n$  — число циклов подъема груза.

Пальцевая эргография позволяет определять зависимость индивидуальной физической работоспособности человека от ритма, в котором выполняются движения, осуществлять сравнительный анализ работоспособности контрлатеральных конечностей у право- и леворуких лиц, выявлять индивидуальную работоспособность в зависимости от массы груза и темпа выполнения движений (тренированность и выносливость). С помощью данного метода исследуют влияние общей усталости организма человека на показатели физической работоспособности, оценивают воздействие на работоспособность психоэмоционального на-

пряжения, отслеживают динамику восстановления работоспособности после травм и соматических заболеваний у спортсменов. Ознакомление с методом пальцевой эргографии предусмотрено учебными программами по дисциплинам «Нормальная физиология» в медицинских учебных заведениях; «Физиология человека и животных», «Физиология физического воспитания и спорта» в педагогических вузах.

Главными недостатками механических эргографов являются низкая надежность регистрирующего устройства, значительная времяёмкость подготовки прибора к обследованию нового испытуемого. Крайне непроизводительно расходуется время на обработку результатов: значительная его часть идет на измерение числа циклов — попыток и высот подъема груза за каждый цикл (в ряде случаев попыток — более 100).

В связи с изложенным авторами разработан электронный эргометр (далее — эргометр), обеспечивающий автоматический подсчет числа попыток подъема груза испытуемым и вычисление суммарного значения затраченной энергии в зависимости от массы груза. При разработке прибора авторы руководствовались следующими соображениями.

1. Эргометр может иметь питание от сети переменного тока, поскольку механическая часть прибора достаточно массивна, громоздка и не может считаться портативной. В силу этого в качестве элементной базы устройства выбраны интегральные схемы (ИС) серии 155 и 555 (ТТЛ/ТТЛШ) со сравнительно высоким энергопотреблением [1; 3].

2. Эргометр должен обеспечивать цифровую индикацию параметров, необходимых для вычисления работы и конечного результата. Для повышения демонстрационных возможностей прибора в больших аудиториях, а также для снижения мощности стабилизатора напряжения канала +5В для питания ИС в качестве индикаторных устройств применены не малоэкономичные семисегментные светодиодные матрицы АЛ или АЛС, а высоковольтные газоразрядные лампы серии ИН-2 и ИН-14.

3. Эргометр должен позволять исследовать динамику развития утомления обследуемого — «кривую утомления», которая проявляется снижением амплитуды сокращений пальца по мере развития усталости. Вследствие этого прибор должен иметь оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), обеспечивающее сохранение («запись») значений энергии, затраченной обследуемым при различных амплитудах сокращений мышц кисти, в соответствующую ячейку памяти.

4. Прибор должен быть прост в эксплуатации, чтобы при необходимости испытуемый мог без затруднений самостоятельно выполнить все обследование.

*Основные технические данные эргометра*

- Мощность, потребляемая от сети переменного напряжения, — 220 В, 50 Гц — 15 ВА max.
- Максимальное число попыток подъема груза, отображаемое на табло, — 999 (3 разряда).
- Максимальная величина затраченной энергии, отображаемая на табло, — 999,9 Дж (4 разряда).
- Погрешность определения затраченной энергии —  $\pm 12 \%$ .

- Диапазон измерения высот подъема груза за один цикл, отображаемых на табло, — 0 — 7 см (1 разряд).
- Точность измерения высоты подъема груза за один цикл —  $\pm 0,5$  см.
- Массы грузов, при использовании которых прибор отображает реальные величины затраченной испытуемым энергии: 1, 2, 4 кг.

*Примечание.* Использование нестандартных грузов для пальцевой эргографии (3 или 5 кг) возможно в режиме «1 кг», но величины энергии, отображенной на табло прибора, необходимо дополнительно умножить соответственно на 3 или 5.

- Число регистров ОЗУ для записи величин энергии — 8, емкость ОЗУ — 128 бит ( $4 \cdot 4$  бит  $\cdot 8$  регистров).

Прибор состоит из следующих функционально завершенных блоков (см. рис.):

- а) фотопреобразователь-формирователь импульсов уровня ТТЛ, к которому относится и механическая часть прибора;
- б) логический блок со схемой индикации высоты подъема и числа подъемов груза;
- в) ОЗУ и индикация величин затраченной энергии;
- г) блок питания.

Регистрация высот подъема груза осуществляется с помощью *фотопреобразователя-формирователя импульсов ТТЛ*. На тросике эргометра закреплена оптическая диафрагма — алюминиевая линейка, в двух параллельных друг другу рядах которой просверлены по 24 отверстия диаметром 2,0 мм. Центры отверстий располагаются на расстоянии 5 мм друг от друга. Таким образом, предусмотрен максимальный возвратно-поступательный (рабочий) ход диафрагмы — 120 мм. (реальный рабочий ход, обусловленный длиной пальца испытуемых с самыми различными антропометрическими данными, лежит в пределах от 40 до 70 мм). В продольном направлении отверстия второго ряда смещены относительно отверстий первого ряда примерно на 0,5 мм. При перемещении груза перфорированная линейка-диафрагма скользит по специальным направляющим, в которых размещены две оптопары VD1-VD4 (АЛ107А, ФДЗ). Импульсы фототоков усиливаются двухкаскадными усилителями постоянного тока VT1-VT4 (КТ315Б). Далее сигналы поступают на формирователи прямоугольных импульсов уровня ТТЛ — триггеры Шмитта D1 (К155ТЛ1). Сигналы с обоих формирователей поступают в логический блок.

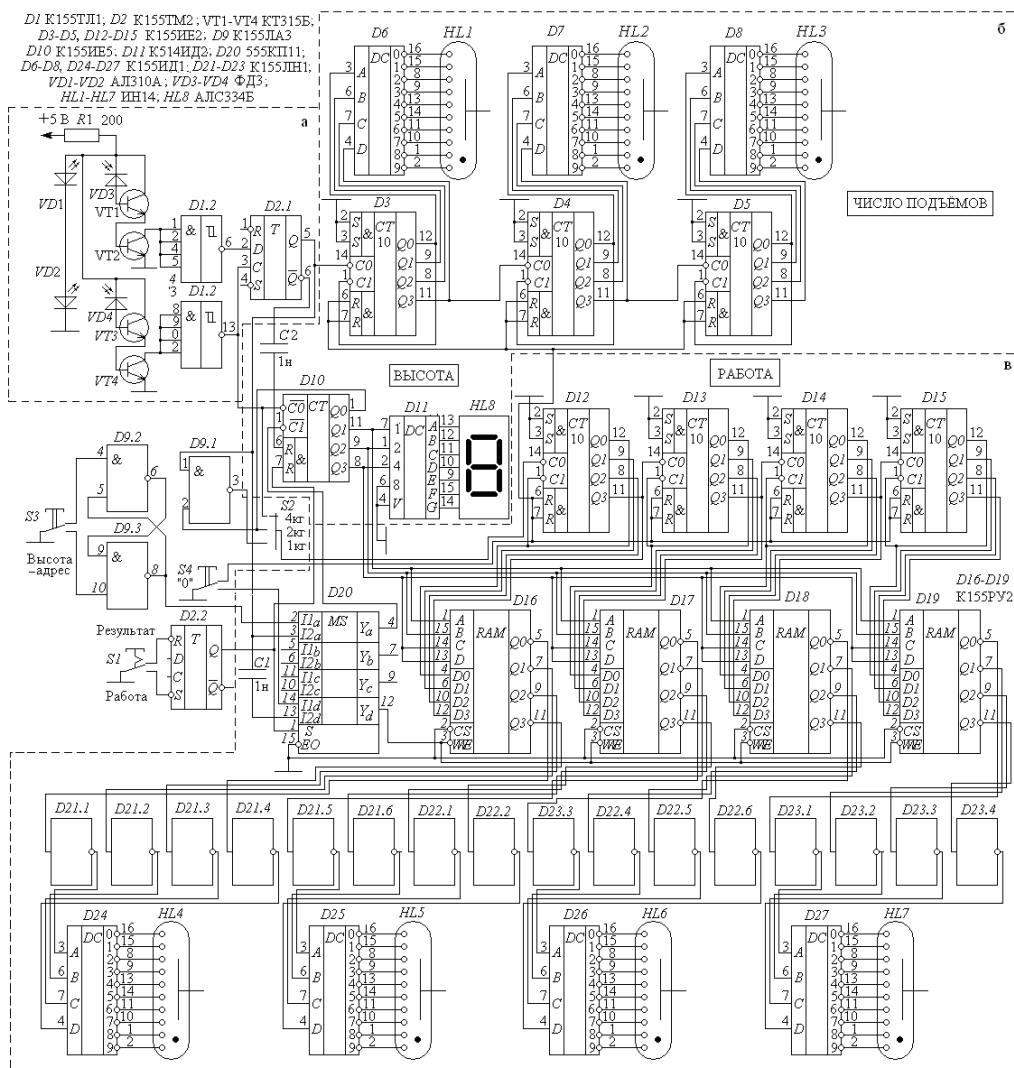


Рис. 1. Принципиальная схема эргометра

*Логический блок со схемой индикации высоты подъема и числа попыток подъема груза.* На D-триггере D2.1 реализован формирователь импульсов, число которых равно количеству подъемов груза. При движении оптической диафрагмы в одну сторону, например вверх (сгибание пальца), фронт импульса, поступающего на вход D триггера D2.1 с выхода D1.1, опережает фронт импульса, поступающего на вход C D2.1 с выхода D1.2, т.к. отверстия первого ряда при движении вверх открываются прежде отверстий второго ряда. Поэтому фронтом первого же импульса на входе C триггер переключается в единичное состояние («1» на прямом выходе триггера) и сохраняет его до тех пор, пока диафрагма не сменит направление движения.

При смене направления движения на противоположное (разгибание пальца — вниз) фронт импульса на входе C триггера будет опережать фронт импульса на входе D. Первый фронт импульса на входе C триггера переключит его в состояние «0». Это состояние сохраняется до начала движения вверх и т.д. При каждом цикле движений вверх—вниз на прямом и инверсном выходах триггера появляется только один импульс, который используется для подсчета числа подъемов груза и управления работой электронного клапана устройства индикации высоты подъема груза.

С инверсного выхода D2.1 импульсы поступают на вход C0 D3 устройства индикации количества подъемов (D3— D5), а с него, через дешифраторы D6— D8, — к газоразрядным лампам HL1—HL3. Трехразрядный индикатор позволяет учесть до 999 подъемов груза. Микросхема D10 определяет высоту подъема, подсчитывая число импульсов, поступающих на ее вход C1 с выхода электронного ключа D9.1. При движении груза вниз электронный ключ D9.1 закрывается отрицательным перепадом импульса с прямого выхода триггера D2.1, счет прекращается и с выходов D10 через дешифратор D11 результат данного цикла выдается в см сегментным светодиодным индикатором.

С инверсного выхода D2.1 в начале следующего цикла подъема груза, через дифференцирующий конденсатор C2 сигнал сброса поступает на входы R микросхемы D10 — счетчик обнуляется и начинается новый цикл измерения высоты подъема, соответствующий новой попытке. Для измерения работы с помощью галетного переключателя S2 сигналы могут сниматься с выходов D9.1, D2.1 или D1.2 в соответствии с величиной поднимаемого груза 1, 2 или 4 кг. При поднятии груза на высоту 1 см оптрон выдаёт 4 импульса — два при движении вверх и два при движении вниз (шаг отверстий в диафрагме — 0,5 см, см. выше).

Для получения дискретности счёта 0,1 Дж ( $A = 1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 0,01 \text{ м} = 0,1 \text{ Дж}$ ) при подъёме груза массой 1 кг подаваемые на вход счетчика работы импульсы необходимо сигналы оптрона с выхода D1.2 делить на 4 подключением S2 к выходу D9.1. При массе 2 кг работа удваивается, поэтому импульсы оптрона делятся на 2 подключением скользящего контакта переключателя S2 к выходу Q0 D10. При 4 кг грузе делитель не используется.

С галетного переключателя S2 сигнал поступает через один из каналов ИС мультиплексора 555КП11 на

счетный вход блока ОЗУ и индикации (D12-D19) величины затраченной энергии. С прямого выхода триггера D2.1 импульс числа подъемов груза поступает через дифференцирующий конденсатор C1 и через один из каналов мультиплексора 555КП11 на вход «запись» WE-HE блока ОЗУ и индикации работы. Импульс формируется в момент завершения движения вверх и начала движения вниз, когда высота подъема груза, служащая кодом адреса записи величины затраченной энергии в ОЗУ, зафиксирована.

Переключатель S1 «работа — результат» (микротумблер МТ-1) размещен на передней панели эргометра. D2.2 устраняет дребезг контактов. Применение мультиплексора 555КП11 позволило сократить число контактов S1. В режиме «результат» вход счетчика «высота подъема» отсоединяется от электронного клапана и присоединяется через защищающий от дребезга контактов второй RS — триггер D9.2-D9.3 к кнопке S3 типа КМ1-1 — «высота подъема — адрес». Канал «разрешение записи» (WE-HE) отключается от конденсатора C1b и подключается к нормально разомкнутому контакту кнопки S4 «обнуление», размещенной на передней панели эргометра. При этом сохраняется возможность ручной подачи сигнала WE-HE низкого уровня. Последнее необходимо для обнуления ОЗУ в начале работы (при «холодном» старте), при подготовке к следующему обследованию.

*Блок ОЗУ и индикации величин затраченной энергии.* Основными элементами блока являются четыре ИС 555ИЕ2 и четыре ИС памяти статического типа (155РУ2), реализующие, соответственно, счет и хранение информации о затраченной энергии. К выходам шины данных каждой ИС 155РУ2 (параллельный код, четыре разряда) подсоединен дешифратор 155ИД1, обеспечивающий индикацию величин энергии на газоразрядном приборе ИН-14 энергии до 999,9 Дж.

Поскольку выходы ИС 155РУ2 передают сигнал с инверсией относительно входа, выходы ИС подключены к дешифраторам через три инвертора 155ЛН1 (шесть логических элементов HE в корпусе). Шина адреса блока ОЗУ четырехразрядная, в соответствии с архитектурой ИС 155РУ2 (16 адресных ячеек по 4 бита). В схеме используются 10 адресных ячеек, соответствующих высотам подъема груза 0 — 7 см. В качестве адреса записи информации об энергии, затраченной на подъем груза, используется код высоты подъема груза, снимаемый с выходов счетчика D10 (соединенных, как изложено выше, со входами ИС дешифраторов 514ИД2 «высоты подъема груза») логического блока.

Благодаря этой особенности прибор позволяет записывать величины выработанной энергии в процессе развития утомления в различные ячейки памяти. Это осуществляется следующим образом. В начале работы, когда испытуемый не утомлен, амплитуда сокращений его пальца составляет, например, 7 см и в течение нескольких десятков попыток подъема груза остается неизменной. При каждом новом цикле движений пальца вверх — вниз по коду адреса десятичной цифры «7» (0111), поступающему на адресные входы А0 — А3 ИС 155РУ2 по сигналу записи (WE-HE), в ОЗУ фиксируется новая величина затраченной энергии, подсчитанная

счетчиками блока ОЗУ. Предшествующая информация при этом стирается автоматически (стандартный режим работы ИС 155РУ2). По окончании импульса *WE-HE* 155РУ2 переходит в режим «запрет записи — сквозной перенос» — информация, минуя память, поступает на ее выходы, дешифруется и отображается индикаторами «работа». Так как движение пальца испытуемого продолжается, индикаторы отображают изменяющуюся, нарастающую величину энергии. В начале следующего цикла движений пальца вверх — вниз происходит запись новой величины энергии: цикл «засчитан». По мере утомления испытуемого, вследствие развития остаточной контрактуры мышц, амплитуда сокращений пальца начнет снижаться. Когда она станет равной 6 см (код адреса — 0110), адрес записи величин энергии изменяется — запись осуществляется в другую ячейку памяти, соответствующую новому коду. В ячейке «7 см» сохраняется конечное значение затраченной энергии на предшествующем этапе работы, в данном случае — до появления начальных признаков утомления.

В дальнейшем, при прогрессировании утомления, амплитуда сокращений пальца упадет еще больше, и когда станет равной 5 см (код 0101), начнется запись в следующую ячейку ОЗУ — «5 см». Конечное значение энергии, выработанной до этого момента, сохраняется в ячейке «6 см». Так продолжается до тех пор, пока амплитуда сокращений пальца не упадет до минимального значения (фактически — 1 см). Таким образом, в конце обследования в соответствующих ячейках памяти сохраняются конечные величины энергии, затраченной человеком по мере развития утомления, — численные значения падающей кривой развития утомления.

Для считывания результата после завершения обследования режимным переключателем «работа — результат» осуществляется блокирование подачи данных и кода адреса (высота подъема) со счетчиков логического блока на вход блока ОЗУ. Одновременно ИС 155РУ2 переводится в режим «считывание данных». Экспериментатор, нажимая кнопку «высота — адрес» вручную, изменяет адрес ячеек ОЗУ, и на цифровой шкале «работа» отображаются величины энергии, затраченной испытуемым до начала утомления и по мере его развития.

Для обнуления результатов и подготовки прибора к новому обследованию экспериментатор нажимает кнопку «обнуление» и, удерживая ее в нажатом положении, последовательно нажимает кнопку «высота — адрес» (чтобы очистить все задействованные в схеме прибора ячейки ОЗУ, нужно нажать десять раз: с 0 по

9-й адрес). При нажатии кнопки «обнуление» на выходах счетчиков блока ОЗУ появляются «0», а ИС 155РУ2 переводится в режим «запись». При каждом новом нажатии кнопки «высота — адрес» нули записываются в соответствующие ячейки ОЗУ — происходит их последовательная очистка.

Блок питания — трансформаторный, обеспечивает два напряжения:

1) +5 В, 1,5 А для питания ИС и светодиодного семисегментного индикатора «высота подъема»; выпрямитель — мостовая схема, диоды КД213А; стабилизатор реализован по общепринятой схеме на ИС 142ЕН5А, укрепленной на теплоотводе площадью около 200 см<sup>2</sup>;

2) +200 В, 10 мА — для питания газоразрядных приборов «количество попыток» и «работа» — нестабилизированный однополупериодный выпрямитель (диод Д226Б).

*Конструктивные особенности.* Эргометр состоит из двух блоков, соединенных между собой гибким кабелем. Первый блок — механическая часть прибора, включающая в себя станину с вмонтированной в нее рукоятью, за которую держится испытуемый при выполнении работы, систему блоков, направляющие для диафрагмы в сборе с оптопарами и саму оптическую диафрагму, приводимую в движение тросиком, соединенным с грузом, а другим концом надетым на палец обследуемого. На станине укреплен фотопреобразователь-формирователь импульсов уровня ТТЛ. Второй блок представляет собой настольный прибор размером 270x250x90 мм, содержащий все перечисленные электронные компоненты, за исключением фотопреобразователей. Для повышения ремонтпригодности все ИС счетчиков и ОЗУ установлены в разъемы. Монтаж смешанный: печатный и монтажным проводом МГТФ.

Использование эргометра на кафедре морфологии, физиологии человека и медико-педагогических дисциплин ВГПУ показало удовлетворительную надежность прибора и удобство эксплуатации даже для малоподготовленных лиц.

### Литература

1. Вениаминов В.Н., Лебедев О.Н., Мирошниченко А.И. Микросхемы и их применение: справ. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 240 с.
2. Мальцева Л.А., Фромберг Э.М., Ямпольский В.С. Основы цифровой техники. М.: Радио и связь, 1987. 128 с.
3. Цифровые интегральные микросхемы: справочник / М.И. Богданович, И.Н. Грель, В.А. Прохоренко [и др.]. Минск: Беларусь, 1991.