

УДК 616.831-053.2-085:[007:57

## Метод для абилитации детей с церебральным параличом и спинномозговыми заболеваниями при использовании эволюционного робота

Е. Р. Дюкенджиев

Лаборатория атипичного протезирования, Рига. Латвия

*The function determines the material and field forms of synergy, the basic law of bionics. Any movement of a purposeful character is realized in the presence of a multilink biokinematic structure and instantaneous control units (synergies) of this structure. Biomechanical or neurological pathology curtails the constructive processes, observed in children with diseases/damages of the brain. The author described purposeful movements at norm and, on this basis, a synthesized back task in case of pathology (deficit of muscular and controlling activities).*

*Функція визначає речову і польову форму синергії — основний закон біоніки. Будь-який рух цілеспрямованого характеру реалізується за наявності багатоланкової біокінематичної структури і моментних блоків управління (синергії) цієї структури. Біомеханічна або неврологічна патологія згортає конструктивні процеси, що спостерігаємо у дітей із захворюваннями/ушкодженнями мозку. Автор описав цілеспрямовані рухи у нормі і на підставі цього синтезоване зворотне завдання у разі патології (дефіцит м'язової і керуючої активності).*

**Ключевые слова:** бионика, абилитация, реабилитация, эволюционный робот, ДЦП, спинномозговые заболевания

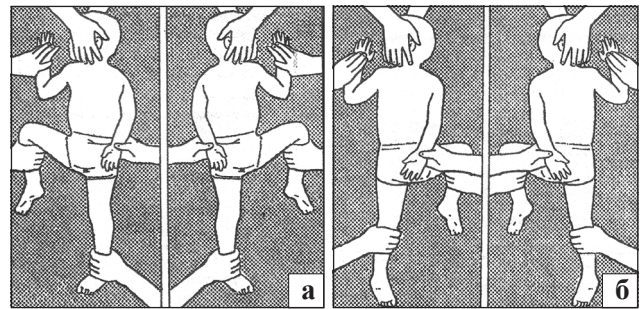
### Введение

Для восстановления детей с повреждением мозга возможно использовать движение как метод лечения с определенной степенью успеха [1]. Эмпирическим способом Г. Доман [2] выделил 13 подвидов движений в трех периодах вертикализации человека:

- I. Ползание на животе
  - перекачивание
  - по кругу или назад
  - беспорядочное
  - гомологическое
  - одностороннее
  - двустороннее
- II. Ползание на четвереньках
  - беспорядочное
  - гомологическое
  - одностороннее
  - двустороннее
  - перемещение по комнате (ходьба с опорой на что-либо)
- III. Ходьба
  - беспорядочная
  - двусторонняя

Лучший результат этого подхода был достигнут, когда трое реабилитологов одновременно имитировали элементы процесса ползания с ребенком (рис. 1, 2) [2]. Эти упражнения повторяли четыре раза в день по 5 мин каждый день без исключений.

Какие причины не позволили Г. Доману достигнуть большего? Во-первых, не было учтено влияние этапов эволюции локомоции на биомеханические



**Рис. 1.** Схема одностороннего воспроизведения движений у детей с церебральными повреждениями, которые не могут ползать на животе (а), и перекрестное воспроизведение движений, когда они могут ползать на животе и на четвереньках, а также могут ходить, но плохо (б)

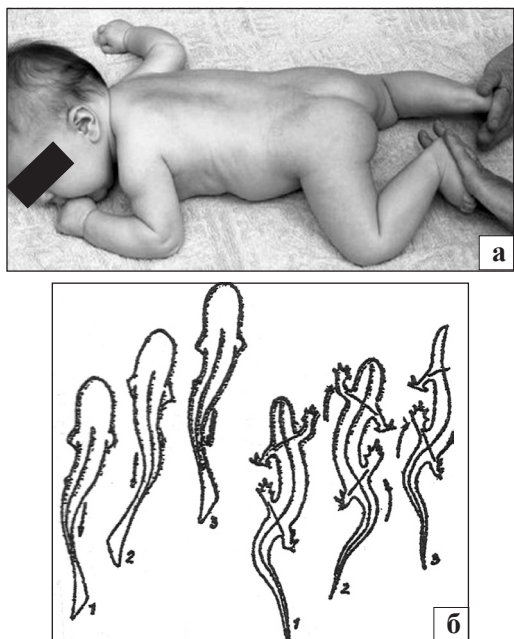


Рис. 2. Фото ребенка (а) и схема движений (б) на стадии I и II

и управляющие структуры тела. Во-вторых, не разграничивали виды движения человека (локомоцию от локомоторики), что привело к неправильному выбору средств воздействия на тело ребенка.

С учетом выявленных недочетов предлагаем новый авторский метод решения проблемы абилитации детей с церебральным параличом и спинно-мозговыми заболеваниями.

*Цель работы:* создание и использование технических вспомогательных средств, реализующих эволюционную структуру перемещения ребенка в пространстве, и методики их применения.

### Материал и методы

Человек как один из биологических видов проходит четыре стадии локомоции:

I — плавательные/волнообразные движения рыб в ограниченном пространстве в период внутриутробного развития (рис. 2) и на суше;

II — примитивная симметричная квазипоходка, характеризующаяся изгибанием осевого скелета в горизонтальной плоскости. Ребенок как будто ползет, но на самом деле он перемещается, опираясь на конечности и скользя на животе (рис. 2, б). Существует статическое равновесие тела, т. к. общий центр масс находится внутри опорного многоугольника;

III — примитивная асимметричная квазипоходка, характеризующаяся изгибанием осевого скелета в вертикальной плоскости. Ребенок перемещается на четвереньках, будто реализуя четырехногую ходьбу, но это не так — все конечности постоянно контактируют с опорной плоскостью, а в режиме симмет-



Рис. 3. Фото ребенка на стадии III движения

ричного функционального блока одни конечности скользят, перемещаясь вперед, другие остаются на месте, но толкают тело вперед (рис. 3). Существует статическое равновесие тела;

IV — двуногая походка. Ребенок уже находится в динамическом равновесии.

Предметом работы явилось создание эволюционного робота, реализующего в автоматическом режиме стадию II (ползание на животе) или III (перемещение на четвереньках). Стадия IV обеспечивается локомоторным роботом автора [3].

Разработка нового класса технических вспомогательных средств роботизированного типа должна базироваться на воспроизведении функций, до сих пор не встречающихся в ортопедической технике: принудительном ползании и ходьбе на четвереньках с помощью внешней энергии, которая передается пациенту опосредованно через управляемую и полностью безопасную трансформацию электрической энергии только в механическое движение. При этом трансформатор энергии и информации должен быть однопараметрическим по отношению ко входящему потоку.

Уникальный механизм автора этим требованиям соответствует и обеспечивает кинематическую взаимосвязь между всеми звеньями тела в циклическом режиме, без жесткой фиксации амплитуд углов крупных суставов.

Ключевым моментом решения однопараметрической задачи обеспечения энергией и управлением является трансформация трехмерного передвижения ребенка при ползании на животе и на четвереньках в контакте с двухмерной опорной плоскостью, учитывая вышеуказанные требования. Автор вертикально проецировал ребенка на пол (рис. 4) и далее генерировал механизм, реализующий в плоскости соответствующую эволюционную стадию передвижения. Чтобы оставить ребенка трехмерно подвижным, была введена кинематическая подвеска

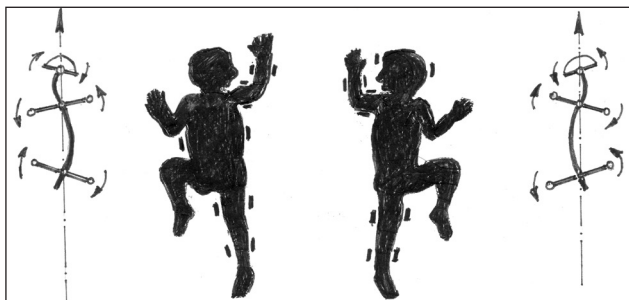


Рис. 4. Проекция ребенка на плоскость

конечностей и головы без фиксации угловых движений в суставах.

### Результаты и их обсуждение

Эволюционный реабилитационный робот, созданный автором (рис. 5) [4], состоит из прямоугольной трубчатой рамы на опорах с подвешенной под ней на ремнях плоскостью для туловища, монтированной ротирующей вокруг продольной оси платформой с прикрепленным под ней механизмом каскадных квазимальтийских крестов. На их левые и правые лучи подвешены ролики, обкатываемые тросами, на концах которых закреплены ортезные кольца и лента для обхвата и подвешивания конечностей и головы пациента.

Механизм каскадных квазимальтийских крестов с внутренним зацеплением и равными периодическими интервалами сегментарного поворота состоит из электродвигателя с регулируемыми оборотами и редуктора, с исходящим валом которого соединен палец первый ведущего звена каскадного механизма. Палец скользит в пазу длинного луча первого креста, имеющего левое и правое плечо. На коротком луче первого креста монтирован палец второй, скользящий в пазу длинного луча второго креста, имеющего левое и правое плечо, а на коротком луче второго креста монтирован палец третий, скользящий в пазу длинного луча третьего креста, имеющего также левое и правое плечо.

На левые и правые плечи всех трех крестов на регулируемом межцентровом расстоянии подвешены ролики, обкатываемые тросами с регулируемой длиной, на обоих концах которых закреплены ортезные кольца для обхватывания конечностей и головы пациента. Слаженная работа всего механизма превращает плоское движение крестов в пространственно-кинематические взаимосвязанные движения конечностей и головы пациента для ползания на животе и передвижения на четвереньках.

Для каждого ребенка регулируют высоту опор, межцентровые расстояния, длину тросов и ремней, скорость движения. Туловище ребенка располагают

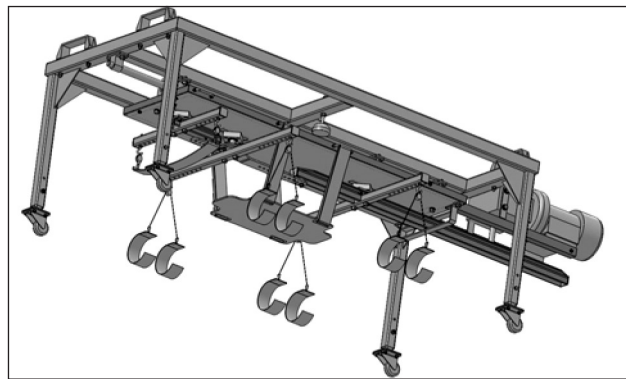


Рис. 5. Фото эволюционного реабилитационного робота

на опорной плоскости, надевают ортезные кольца на конечности и ленту на голову. При подаче внешней энергии электродвигатель движет редуктор, а палец первый на выходе редуктора начинает совершать круговое движение и приводит длинный луч первого креста налево, а через заданный период квазипокоя — направо. Через палец второй приводится в движение направо второй крест, а затем через заданный период квазипокоя — налево; через палец третий осуществляется аналогичное перемещение третьего креста. Вследствие этих колебательных движений в горизонтальной плоскости под силовым воздействием тросов, ортезных колец и ленты вначале, проскальзывая, выносится вперед левая нога ребенка, а левая рука отводится назад, толкая тело вперед и одновременно двигая правую ногу назад. При перемещении тела вперед правая рука, проскальзывая, выносится вперед и голова отклоняется направо. Через заданный период квазипокоя движения конечностей и головы повторяются зеркально: левая нога отводится назад, отталкивая тело вперед, проскальзывая, выносится вперед левая рука, голова отклоняется налево, правая нога, проскальзывая, выносится вперед, а правая рука отводится назад, отталкивая тело вперед. Изменяя скорость электродвигателя, обеспечивают разную скорость ползания. Для перемещения на четвереньках под размеры ребенка регулируют вышеописанные параметры до положения, когда лежащий на плоскости ребенок опирается коленками и локтями на пол. При подаче внешней энергии пациент вместе с роботом движется по полу описанным способом (рис. 6).

Для применения робота необходимо составить график реабилитации по авторскому методу. Его суть состоит в восстановлении биоэнергетического баланса ребенка при помощи внешней энергии. В норме существует прямая зависимость — ребенок использует внутреннюю биоэнергию для осуществления движения. Валовая (брутто) метаболическая мощ-



Рис. 6. Фото ребенка с эволюционным роботом

ность ( $E_g$ ) определяется уравнением Макадева Л. О.  
 $E_g$  [ккал/мин] =  $0,047Q + 1,024$   
 где  $Q$  — вес ребенка, кг.

Формула применяется при скорости передвижения до 1,34 м/с.

В условиях патологии для осуществления движений ребенку необходима внешняя энергия. Учитывая, что режим мышечной активности, для которого характерна отрицательная работа мышц (уступающий режим), требует воздействия внешней энергии приблизительно в 10 раз большей, то электрический двигатель и механизм должны ее обеспечить заранее.

Ежедневная норма ползания [2] указана в табл. 1.

Ежедневная норма передвижения на четвереньках [2] указана в табл. 2.

Ежедневная норма двуногой ходьбы в возрасте 3–4 лет:  $\ell = 600 - 1\ 600$  м.

Например, для пациента Н., 4 года (рис. 6), общее ежедневное расстояние определяется формулой:

$L = \ell_{\text{полз}} + \ell_{\text{четв}} + \ell_{\text{дв}} = 273 + 720 + 1\ 200 = 2\ 193$  м  
 при скорости 0,1 м/с. Получается временной эквивалент 21 930 с.

Оценивая по критериям Е. Дюкенджиева [1] интегральное отставание в развитии  $H = 31$  мес. при хрональном возрасте 4 года (48 мес.), суммарный дефицит мышечной и управляющей активности в объеме 38 мес. надо компенсировать внешней энергией, эквивалентной времени проведенных сеансов.

В среднем четырехлетнему ребенку надо преодолевать 720 м. При пяти сеансах и скорости передвижения 1 м/с получается продолжительность сеанса 144 с (2,4 мин), тогда  $E_b = 5,81$  Вт/с.

Если скорость передвижения составляет 0,1 м/с, то время одного сеанса увеличивается до 1 440 с (24 мин). Выполняя 4 недели по пять сеансов ежедневно, получим время:  $t = 4 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 1\ 440 = 201\ 600$  с. Реально в день возможно работать половину суток, т. е. 12 часов, что составляет 43 200 с. Тогда

Таблица 1. Норма ползания в зависимости от возраста

Возраст, годы	Расстояние, м
1–2	68–113
3–6	68–273

Таблица 2. Норма ходьбы на четвереньках в зависимости от возраста

Возраст, годы	Расстояние, м
3–4	564–720
5–6	728–910
От 7	1456–2184

продолжительность одного сеанса будет 8 640 с (2 ч 40 мин). Таким образом, график реабилитации предполагает обязательный объем работы в количестве пяти сеансов по 2 ч 40 мин. Целесообразно эти сеансы проводить после первого и второго завтрака, обеда, полдника и ужина.

Очень важно по окончании всего цикла реабилитации продолжить работу на следующем уровне. Ребенок заметно уменьшил дефицит мышечной и управляющей активности, и поэтому надо предоставить ему возможность самостоятельно двигаться. Для этого автор создал в домашних условиях микроцентр, состоящий из потолочной балки по длине всей комнаты с электротельфером для подъема и зеркальной стены с целью самонаблюдения перемещения (рис. 7). Ребенка подвешивают, как показано на рис. 8, и он самостоятельно ползет на животе или перемещается на четвереньках.

Авторский метод и эволюционный робот, работая в уступающем режиме при помощи внешней энергии, воздействует на детей с детским церебральным параличом и спинномозговыми заболеваниями так:

- отрицательная работа совершается над мышцами.

Внешняя энергия, передаваемая телу и теряемая



Рис. 7. Домашняя реабилитация



Рис. 8. Самостоятельное ползание

им во время работы, переходит к мышцам, где частично рассеивается в виде тепла, частично накапливается в виде энергии упругой деформации, а также используется при биохимических и биофизических трансформациях;

- у ряда патологий, имеющих ярко выраженный дефицит мышечной и управляющей активности, наблюдается «втверждение» активных мышц.

Но в случае принудительного растягивания:

- при отрицательной работе мышца, с одной стороны, затрачивает энергию, освобождаемую при метаболических реакциях, а с другой — получает ее за счет производимой над ней механической работы под воздействием внешней энергии;
- в мышцах накапливается энергия упругой деформации;
- внешняя энергия, получаемая мышцами при растяжении, используется при биохимических реакциях;
- передвижение (ползание, перемещение на четвереньках, двух ногах) является высокоавтоматизированным комплексным процессом. В частности, цикл перемещения/шага всегда начинается и заканчивается определенной позой. Энергия, необходимая для его выполнения, обеспечивается работой мышц, основой которой являются метаболические превращения в мышцах, т. е. метаболическая энергия. Для реализации какой-либо фазы шага используется не метаболическая, а потенциальная энергия упругой деформации, накопленная в элементах мышц и сухожилиях во время предыдущей фазы движения. В каждом промежутке времени в пределах одного цикла ходьбы механическая работа мышц представляет собой сумму затраченной метаболической и неметаболической энергии.

Использование неметаболической энергии выражается в увеличении силы, скорости и мощности

сокращений мышц, а также снижении энергозатрат при той же механической работе.

Эти факты объясняют тремя причинами:

1) усилением эфферентного потока к растянутым мышечным группам (по типу механизма стреч-рефлекса);

2) увеличением биомеханического потенциала мышц (усилением сократительных возможностей мышц, не связанным с усилением эфферентного потока к ним и накоплением упругой деформации);

3) накоплением и отдачей потенциальной энергии упругой деформации эластическим неконтрактивным компонентом мышц и сухожилий.

Кроме того, принудительное растяжение мышц реципрокной ортезной системой при помощи внешней энергии вызывает на основе биомеханической потенции мышц обратный переход механической энергии в биохимическую. Это результат повышения способности мышц производить положительную работу, если она следует незамедлительно за растяжением активных мышц (Fann, 1924).

Исследования (Hill, 1960–1971) показали способность мышц не только производить, но и поглощать механическую работу, превращая ее в потенциальную энергию химических связей. Следовательно, принудительно растягиваемые мышцы способны синтезировать химические соединения, которые в дальнейшем могут быть использованы как дополнительный источник производимой механической работы.

## Выводы

Преимущества созданного робота связаны с возможностью использования его как в клинике при участии специалистов, так и в домашних условиях под контролем родителей.

Абилитация с роботом не требует физических усилий от ребенка и обслуживания оператора.

Применение робота позволяет воспроизводить в автоматическом режиме обе стадии первичного перемещения — ползание на животе и ходьбу на четвереньках.

## Список литературы

1. Дюкенджиев Е. Бионика в реабилитации детского церебрального паралича и спинномозговых заболеваний. Т. I. / Е. Дюкенджиев. — Рига: Рижский технический университет, 2011. — 178 с.
2. Доман Г. Что делать, если у вашего ребенка повреждение мозга / Г. Доман. — М.: Теревинф, 2007. — 330 с.
3. Dukendjiev E. Rehabilitācijas lokomotorā robots. Patenta pieteikums Nr. P. 12–15, 31.01.2012.
4. Dukendjiev E. Evolūcijas rehabilitācijas robots. Patenta pieteikums Nr. P. 12–59, 16.04.2012.