

ИСТОРИЯ ПРОЕКТА

(из служебной записки А.К.Платонова о развитии работ в 2013 г.):

1. Описываемые исследования начались по инициативе **Д.Е. Охоцимского** в 70-х годах XX века и первоначально велись совместно с югославским учёным **Миомиром Вукобратовичем** в интересах создания экзоскелетона для протезирования движений ног спинальных больных.

В рамках этой работы **В.В. Белецким** методами математического моделирования на созданной нами в ИПМ дисплейной системе БЭСМ6 - SDS-910 было выполнено важное исследование проблем механики и управления двуногой ходьбой - в нужном для протезирования варианте ходульной кинематической схемы ног. Это и другие исследования проблем управления ходьбой и прыжками (**В.В.Лапшин**) «стопоходящих» (по терминологии **П.Л.Чебышова**) движителей были выполнены методами математического моделирования на БЭСМ6 с демонстрацией получаемых движений в виде фильмов, снятых с экрана SDS-910. Они со всей очевидностью показали недостаточность динамического диапазона электромеханической техники того времени и е1 большие масс-габаритные характеристики с точки зрения перспектив реального создания автономно управляемого и носимого варианта экзоскелетона.

Это обстоятельство привело к остановке исследований проблем управления экзоскелетонами. Важно отметить, что попытка разработки механики и гидравлики мощного экзоскелетона с копирующим аналоговым управлением в те годы была успешно выполнена во ВНИИТрансМаш в отделении **А.Л.Кимурджиана**.

2. Позже усилиями **Д.Е. Охоцимского** эти работы продолжились, и они уже более 10 лет они проводятся в нашем секторе по межакадемическому договору РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша и Институт физиологии им. И.П. Павлова) с Болгарской академией наук (Институт механики и биомеханики). Они направлены на изучение физиологии процессов реабилитации больных с недостатками подвижности конечностей («паралегиков»). До последнего времени эти работы не имели внешней финансовой поддержки и выполнялись за счёт бюджетных средств упомянутых институтов.

Тем не менее, коллективными усилиями этих трёх институтов были успешно выполнены разработка и создание электромеханического тредбана для выполнения в ИФ им. И.П. Павлова исследований (**Ю.П.Герасименко, О.А.Никитин**) процесса реабилитации спинальной кошки. Здесь следует отметить и важную роль фирмы ООО «Растротехнология», расположенной на территории опытного производства ИПМ и возглавляемой **Е.Б. Кульбацким**, выполнившей нужную доработку конструкции тренажёра по предложениям будущего сотрудника сектора, а тогда аспиранта - **Н.С. Сербенюка**.

На этом тренажёре-тредбане с экзоскелетонной реализацией движений задних ног спинальной кошки в ИФ им. И.П. Павлова был получен

ставший знаменитым важный экспериментальный результат (спинальная кошка – почти самостоятельно стала ходить), открывший надежду на возможность формирования путей излечения тяжёлых последствий травмы позвоночника.

Заметим, что полученный эффект восстановления генераторов шагания в спинном мозге спинальной кошки был достигнут сотрудником ИФ **к.б.н. О.А. Никитиным** не только путём использования регулярной ходьбы кошки на тренажёре, но и, что важно, - путём длительного массажа мякоти задних лап кошки, лежащей на его коленях, сопровождаемого принудительными движениями лап в ритме шагания.

Упомянутыми экспериментами в ИФ было показано, что *ключевым моментом возможного достижения реабилитации парализованных является малоисследованная проблема организации и стимуляции афферентных (центростремительных) сигналов, поступающих в спинной и в головной мозг человека в процессе его реабилитационной ходьбы на тренажёре.*

Такие афферентные сигналы формируются нервными окончаниями стопы и костно-мышечного аппарата животного и человека в моменты постановки и последующих процессов опоры и переноса ног. При этом, тренажёрное формирование таких афферентных сигналов необходимо не только для реабилитационного восстановления генераторов шагания в спинном мозге, но и, что важно, - для предотвращения атрофии неработающих мышц и умирания связанных с мышцами нервных клеток в процессе возникающего *апоптоза* - известного механизма прекращения организмом поддержки физиологических процессов в мышцах и в нервных окончаниях в случае отсутствия их активности.

Исследования проблемы формирования афферентных и стимулирующих сигналов сотрудники ИФ им. И.П. Павлова стали проводить совместно с Велико-Лукской Академией физкультуры (**Р.М.Городничев**) и с Институтом медико-биологических проблем (ИМБП) РАН (**И.Б.Козловская**). Развернулись они и в США (при участии российских учёных). Такие исследования остро нуждаются в разработке мехатронных средств управления и синхронизации процессов движения с процессами формирования стимуляционных воздействий на нервы позвоночника и афферентных сигналов обратной связи в многоуровневой нервной системе построения движений человека. Исследования техники и алгоритмов в этом направлении стали проводиться в ИПМ по планам института. Широкий спектр фундаментальных исследований в этом направлении в разных институтах в настоящее время поддержан грантами ОФИ-М РФФИ.

3. В прикладном аспекте этих результатов в середине 90-х годов остро встал вопрос о создании специального биомехатронного тренажёра для человека, отличающегося от обычных биомеханических тренажёров типа «бегущей дорожки» - требуемым богатством оснащения медицинского тренажёра эффекторными и сенсорными элементами управления. Такой тренажёр необходим для исследования процессов стыковки управления мощными двигателями приводов движений ног человека со слабыми сигналами обратной связи об их физиологическом состоянии.

В связи с этим в 2005 г. была предпринята попытка поиска необходимых средств для конструирования и изготовления требуемого тренажёра силами упомянутой фирмы, возглавляемой **Е.Б. Кульбацким**. Попытка совместного обращения к зарубежным инвесторам оказалась неудачной, в следствие чего работы фирмы «Растротехнология» в этом направлении прекратились.

4. Вместе с тем, в это же время неожиданно наметилась возможность приблизиться к решению проблемы создания тренажёра для спинального больного в виду появления в нашем поле зрения тяжелого спинального больного (назовём его «А.М.Н.»). По нашей с Д.Е. Охоцимским просьбе заведующий лабораторией в ИФ им. И.П. Павлова д.б.н. Ю.П. Герасименко устроил А.М.Н. в клинику в Санкт Петербурге, где ему была оказана профессиональная медицинская помощь.

А.М.Н. задался целью изготовить для себя тренажёр, и стал делать это, пользуясь своими связями и достаточно скудными доступными ему средствами финансирования. Последнее обстоятельство не позволило реализовать в конструкции тренажёра ряд советов сотрудников ИФ. В результате воистину героических усилий А.М.Н. был создан биомеханический тренажёр на базе тредбана, который, к сожалению, пользы ему не принёс, поскольку в нём не были реализованы требуемые биомехатронные средства афферентации и управления движением ног.

Весной 2012 года **Ю.П. Герасименко** вместе с сотрудником сектора **С.Н. Емельяновым** посетили А.М.Н. Во время их встречи наметились пути доработки имеющегося тренажёра.

У этой работы, в случае её успеха, видна длительная перспектива. После наладки сотрудником ИПМ **С.Н. Емельяновым** механизма и контроллера тредбана будет получен опыт точного управления мощным трёхфазным двигателем, требуемый для тонких алгоритмов реализации синхронного движения тредбана с движением ног параплегика. Впоследствии после наладки всего тренажёра возникнет отсутствующая в настоящее время возможность прямого наблюдения в пределах Москвы обстоятельств выполнения реабилитационного процесса на большом тренажере. Это крайне необходимо как для создания средств точных измерений сигнальных параметров сенсорных и управляющих систем, так и для получения недостающей информации о требованиях к программному обеспечению тренажёра и интерфейсу управляющего компьютера. В частности есть надежда продвинуться в понимании конкретики процедур применения разрабатываемых в настоящее время в секторе элементов биомехатроники: афферентного голеностопа, СкинОмметра и зрительной системы наблюдения и анализа параметров походок человека.

5. Здесь следует обратить внимание на следующее: поскольку до последнего времени финансовой поддержки для отечественной разработки биомехатронного тренажёра найти не удавалось, то некоторые достаточно богатые российские медицинские учреждения стали приобретать разработанный в Швейцарии оснащённый экзоскелетом и устройством подвеса больного биомеханический тренажёр «Локомат» фирмы Носома.

Именно на таком тренажёре в прошлом (2011) году в ЛосАнжелесе при непосредственном участии **Ю.П. Герасименко** был получен уникальный первый медицинский случай реализации тренажёрной помощи спинальному больному. *Одновременно этот результат ещё острее продемонстрировал необходимость разработки специализированной мехатроники для дооснащения биомеханических тренажёров.*

Получить доступ к зарубежной технике и организовать работу «с отвёрткой и паяльником» на территории медицинского учреждения – крайне затруднительно и мало эффективно. В связи с этим чувствуется острая необходимость разработки *доступного отечественного биомехатронного тренажёра с практической возможностью реализаций его требуемого развития и совершенствования.*

Решению этой проблемы посвящены описываемые ниже работы, выполняемые по упомянутым выше грантам РФФИ ОФИ-М.

6. Прежде всего следует отметить пионерскую отечественную реализацию тренажёра кровати «Вертикаль», выполненную в 2000-е гг. сотрудниками ИППИ РАН, ИМех МГУ и ЦКБ РАН.

На совещании участников проектов ОФИ-М РФФИ в ИМБП РАН в начале 2011 г (**И.Б.Козловская, Ю.П.Герасименко, А.К.Платонов**) было принято решение сосредоточиться в 2011–2012 гг. на развитии афферентационной функциональности тренажёра «Вертикаль» средствами ИМБП и его использовании в исследованиях ИФ РАН. Эти работы были проведены в ИФ **Ю.П.Герасименко** и **Т.Р. Мошонкиной** совместно с сотрудником ИППИ **А.А.Гришиным**. ИПМ принял финансовое участие в выполнение этих работ.

7. В середине 2000 гг обсуждение сложившейся в то время ситуации в коллективах ИПМ, ИФ и ИМ БАН привело к решению ограничиться созданием проекта средств афферентации стопы пациента и измерения её кожного сопротивления. В соответствии с этим решением и планами межкадаемических работ РАН-БАН в ИМ БАН совместно с ИПМ были выполнены и запатентованы два проекта ботинка со средствами кожной стимуляции стопы.

В ИПМ в соответствии с упомянутым решением были разработаны две реализации измерителя кожного сопротивления «СкинОмметр» со сверхнизким воздействием на человека величиной прикладываемого к телу электрического тока (на уровне десятков наноАмпер), исследованы его технические свойства и созданы эффективные аппаратно-программные средства фильтрации эфирных электромагнитных сигналов, снимаемых с кожи человеческого тела.

В настоящее время коллективом сотрудников сектора (**В.С. Ярошевский, О.В. Трифонов, Н.С. Сербенюк и С.Н. Емельянов**) с помощью разработанного СкинОмметра и его программного обеспечения проводится формирование средства анализа и диагностики физиологического состояния мышц человека. Эта работа поддержана упомянутым грантом РФФИ № 1-01-12060-офи-м-2011-2012гг. Кроме того, в рамках упомянутого межкадаемического соглашения в ИМ БАН совместно с ИПМ (**В.С. Ярошевский, О.В. Трифонов и В.Е.Павловский**) началось выполнение

работ по реализации мехатроники афферентной подошвы, как элемента тренажёра голеностопа для человека.

В связи с этим, в интересах исследования возможности исключения процессов апоптоза и атрофии мышц путём выполнения первичных тренажёрных воздействий на человека, получившего спинномозговую травму, в ИПМ силами **В.Е. Павловского с аспирантами** выполняется разработка и изготовление механики и мехатроники тренажёра голеностопа человека, оснащённого пневматическими средствами афферентации и электрической стимуляции ноги человека. Эта работа выполняется с финансовой поддержкой гранта РФФИ № 1-01-12060-офи-м-2011-2012гг.

8. Далее следует коснуться проблем разработки экзоскелетона. Упомянутая актуальность разработки большого тренажера человека наряду с запросами армии и производств с тяжелым физическим трудом оживили в мире и в России интерес к созданию экзоскелетона, в частности, - экзоскелетона для движений ног параплегиков.

Такие работы, как было сказано выше, были начаты в конце 70-х гг XX века югославским учёным Миомиром Вукобратовичем, проводились нами совместно с ним на протяжении ряда лет и были остановлены после первых результатов, полученных М.Вукобратовичем и В.В. Белецким, показавших их нереализуемость в технических возможностях конца XX века.

В настоящее время эта проблема уже нашла успешное решение в США, в Японии, и, в меньшей мере, в ряде стран Европы. В связи с этим в научных институтах России снова возник большой интерес к проблемам создания экзоскелетона.

В рамках того же гранта РФФИ №1-01-12060-офи-м (2011-2012гг.) «Биомехатроника тренажёра-кровати для лечения спинальных больных» **В.Е. Павловским с аспирантами** создаётся макетная система мехатронного тренажёра «полукровать-манекен-экзолегопулятор», предназначенного для исследования проблем мехатроники средств формирования движений ног человека с синхронной движению стимуляционной афферентацией его стоп в реальном времени процессов имитации ходьбы и приседаний лёжа и стоя. При этом, для обеспечения движений ног манекена наиболее эффективным оказался именно экзолегопулятор, с кинематической схемой отличающийся от кинематической схемы экзоскелетона. Решение проблем управления его движением имеет важное научное и прикладное значение.

Для формирования программных сигналов управления степенями подвижности экзослегопулятора, адекватных привычным параметрам походки пациента, С.М. Соколов и А.А. Богуславский создают систему зрительного анализа походок человека, отличающейся более удобными функциональными свойствами от известной зарубежной системы «Контек».

9. Другой грант РФФИ: №11-04-12067офи-м-2011 «Разработка модели экзоскелетона руки человека и системы его сопряжения с интерфейсом мозг-компьютер» (рук. Е.В.Бирюкова) выполняется в Институте Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН (ИВНДиНФ). Он направлен на исследование проблемы лечения больных с ограниченной подвижностью рук и нацелен на создание интерфейса мозг-компьютер

(ИМК) для распознавания двигательного желания человека и его реализации мехатронно-манипуляционными средствами.

В рамках участия в творческом коллективе этого гранта В.Е. Пряничников с сотрудниками разработал оригинальный манипуляционный механизм с мехатронным управлением, предназначенный для имитации распознаваемых движений человека. В работах по этому гранту активное участие принимает сотрудник сектора С.Н. Емельянов. Им в 2012 г. были изготовлены механика и электроника двух тренажёров для лечения кисти руки: тренажёр «Перчатка» для сгибания-разгибания кисти вялой руки после инсультных больных и тренажёр «Пальцы» для разгибания импульсивно сжатых пальцев кулака.

Упомянутый второй тренажёр ярко обозначил *серьёзную проблему специфичности конструкции тренажёров руки*. Похоже, что в ряде случаев необходимо уметь разрабатывать и изготавливать механику и электронику тренажёра применительно к обстоятельствам подвижности руки конкретного больного с конкретной спецификой его болезни. С похожей проблемой давно знакомы разработчики протезов и ортезов.

Именно с этой ситуацией столкнулись и мы: ИВНДиНФ был крайне заинтересован в наблюдении и исследовании характера ЭЭГ сигналов движения пальцев конкретного больного (назовём его «Н.»), пережившего тяжёлую мозговую травму и получившего в результате наряду с общей малоподвижностью половины тела сильную *спастичу* (непроизвольное напряжение мышц) левой руки. Оказалось, что для этого больного разработанный тренажёр «Перчатка» был совершенно бесполезен из-за сильно сжатого кулака руки пациента. К чести С.Н. Емельянова он сумел придумать и в короткие сроки изготовить тренажерный стенд для реализации управляемого компьютером (связанного с энцефалографом) усилия разгибания указательного и большого пальцев спастичной руки. Похоже, что в процессе формирования исследования свойств ИМК и изменения состояния больного этот стенд придётся ещё не раз переделывать. Эти работы территориально выполняются в ИВНДиНФ и отчасти – в ИПМ.

Перечисленные выше работы ряда академических организаций, поддержанные грантами ОФИ-М РФФИ, показывают, что к настоящему времени (конец 2012 г.) в ИПМ накоплен опыт, полезный для развития современных направлений биомехатроники, связанных с внедрением средств очувствления пациента в систему управления движением механики тренажёра.

При этом, достаточно очевидны социальная и естественно-научная значимости создания таких биомехатронных тренажёров, нужных и для лечения параплегии, и для исследования специфичных физиологических проблем подвижности конечностей людей после перенесённых травм и болезней нервной системы.