

ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

А.А. Гришин, Т.Р. Мошонкина, Е.В. Боброва, Ю.П. Герасименко

Комплекс для реабилитационного лечения пациентов с двигательной патологией с использованием механотерапии, чрескожной электростимуляции спинного мозга и биологической обратной связи

Аннотация

Разработан комплекс «Биокин» для реабилитации пациентов с двигательными нарушениями неврологического профиля, обеспечивающий возможность осуществления механотерапии в сочетании с чрескожной электростимуляцией спинного мозга и биологической обратной связью (БОС). Комплекс «Биокин» включает в себя механический блок для перемещения нижних конечностей пациента, пятиканальный стимулятор «Биостим-5» для чрескожной спинальной электростимуляции, блок биологической обратной связи, блок управления и коммутации, управляющий компьютер. Комплекс может использоваться в условиях лечебных, лечебно-профилактических и научно-исследовательских медицинских учреждений или в домашних условиях.

Введение

Клинические исследования показали эффективность и актуальность использования механотерапии – принудительного перемещения конечностей для реабилитации двигательных нарушений после травм, инсультов, при детском церебральном параличе (см., например, [1], [2]), в том числе для предотвращения тромбоэмболии в палатах интенсивной терапии [3].

Признанным лидером в механотерапии двигательной активности является роботизированный комплекс «Локомот» – устройство для поддержания веса тела человека и совершения навязанных шагательных движений по беговой дорожке. Однако у «Локомата» имеются существенные ограничения: во-первых, он применяется для ходьбы в вертикальном положении и его невозможно использовать для пациентов в острой стадии заболевания. Во-вторых, он не обеспечивает должным образом опорные нагрузки при осуществлении шагательных движений. Другие аппараты для механотерапии – «Эриго», «Мотомед» – предусматривают возможность проведения процедур в положении лежа. Однако они, как и «Локомот», не предусматривают комбинированного режима управления, т. е. самостоятельного движения одной конечности и пассивного, т. е. с помощью двигателя, второй (паретичной) конечности, что актуально в случае гемипарезов вследствие инсультов и травм.

В нейрореабилитации в последние годы эффективно используется электрическая стимуляция спинного мозга, направленная на активацию нейронных локомоторных сетей, контролирующих ритмические движения нижних конечностей [4]. Этот метод основывается на представлении о том, что программа локомоторной активности формируется специализирован-

ной нейрональной сетью спинного мозга (генератор шагательных движений), которая обеспечивает стереотипную ритмическую координированную активность мышц каждой конечности, межконечностную координацию, а также координацию активности мышц конечностей и туловища для передвижения в пространстве [5]-[7].

Одновременное применение механостимуляции (стимуляция чувствительных рецепторов мышц, суставов, опорной поверхности стоп) и электростимуляции (активирующее воздействие на спинальные локомоторные сети и сети, предназначенные для поддержки вертикальной позы) обеспечивает одновременную активацию спинальных локомоторных сетей по двум регулирующим каналам, что приводит к синергии электрического и механического стимуляционных воздействий, как показано в экспериментах на лабораторных животных [8] и в клинических исследованиях у пациентов с двигательными нарушениями вследствие травмы спинного мозга [4], [9], [10].

БОС применяется в дополнение к механотерапии в устройстве «Локомот» [11], в том числе и с использованием игровых приставок [12]. В качестве сигнала БОС используются величины сил, прилагаемых пациентом, что дает ему возможность оценить собственный вклад в движение [13], [14].

Отметим, что среди применяемых для двигательной реабилитации аппаратов не существует устройства, которое обеспечивало бы перемещение нижних конечностей с одновременной стимуляцией спинного мозга, снабженного, кроме того, БОС.

Описание комплекса

Комплекс позволяет осуществлять внешнее управление двигательными функциями посредством механической стимуляции рецепторов нижних конечностей и неинвазивной чрескож-

ной электростимуляции спинного мозга (ЧССМ), а также вовлекать в процесс реабилитации супраспинальные структуры посредством БОС по зрительным или слуховым входам [15]. Комплекс обеспечивает возможность вертикализации пациента с помощью функциональной медицинской кровати, на которой монтируются функциональные элементы комплекса. Блок-схема комплекса представлена на рис. 1.

1. Блок перемещения ног (БПН) – механический блок для проведения механотерапии, включающий в себя:

- а) два субблока перемещения (в диапазоне до 60 см) правой и левой стоп для сгибания нижних конечностей в коленном и тазобедренном суставах;
- б) два субблока поворота правой и левой стоп, диапазон изменения угла в голеностопном суставе в направлении подошвенного сгибания до 45 угл. град, тыльного сгибания – до 15 угл. град;
- в) комплект биомеханических датчиков, включающий в себя датчики смещения каретки, голеностопного угла, продольной силы ноги и момента сил, развиваемого пациентом в голеностопном суставе.

Программное обеспечение, управляющее БПН, позволяет выбирать режим работы: активный (перемещение конечности осуществляет сам пациент), пассивный (перемещение конечности осуществляет комплекс) или комбинированный (одна нога совершает движение самостоятельно, вторая – за счет двигателей); регулировать длительность цикла шагания и нагрузку на каждую ногу; амплитуду перемещения стопы и изменения угла в голеностопном суставе; начальное положение стопы; темп движения; сдвиг фаз между движениями ног; запуск и остановку движения.

2. Пятиканальный электрический стимулятор «Биостим-5» для стимуляции спинного мозга позволяет осуществлять мульти сегментарную стимуляцию спинного мозга. Для стимуляции используются модифицированные токи Коца (рис. 2): низкочастотный (1...100 Гц) сигнал, прикладываемый к позвоноч-

нику, заполняется высокочастотной (4...10 кГц) составляющей, что обеспечивает безболезненность стимуляции [5]. Существует возможность запускать, регулировать и контролировать параметры стимуляции либо одновременно, либо независимо по каждому из пяти каналов: ток стимуляции, амплитудное значение которого лежит в диапазоне 0...250 мА при нагрузке 500 Ом; длительность импульса низкочастотного сигнала в диапазоне 0,1...1 мс; частота следования импульсов 1...100 Гц.

3. Блок БОС включает в себя средство передачи изображения (монитор) и средство передачи звука (наушники для слабовидящих пациентов).

4. Блок управления и коммутации.

5. Персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) с предустановленным программным обеспечением. Программа управления комплексом поддерживает базу данных пациентов, обеспечивает связь с элементами комплекса, настройку, запуск работы и остановку комплекса, а также отображение различных параметров, характеризующих ход проведения процедуры. Оператор может задавать параметры процедур механотерапии и электростимуляции, сохранять их в карте пациента на жестком диске для повторного проведения процедур, отслеживать текущее состояние модулей, входящих в состав комплекса, обеспечивать отображение информации, вырабатываемой системой БОС.

Методика проведения реабилитационного лечения

1. Определяют характер неврологической симптоматики, опороспособности позвоночника и его толерантности к нагрузке. Индивидуально подбирают алгоритм применения методов лечения, параметры механовоздействий и ЧССМ.

2. Пациента помещают в устройство для перемещения ног сидя, полулежа или лежа – в зависимости от его состояния. Голеностопные суставы правой и левой ног прочно фиксируют с помощью подпружиненных ремней в правый и левый блоки для перемещения стоп. Накожные электроды для стимуля-



Рис. 1. Блок-схема комплекса

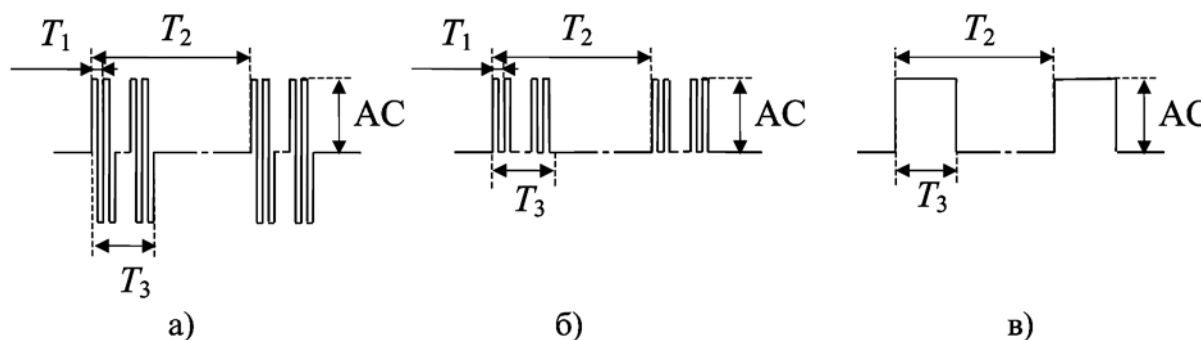


Рис. 2. Форма импульсов тока при электрической стимуляции спинного мозга: а) модулированный биполярный стимул; б) модулированный монополярный стимул; в) стимул без высокочастотной составляющей; T_1 – период высокочастотного стимула; T_2 – период низкочастотного стимула; T_3 – длительность импульса низкочастотного стимула; AC – амплитуда стимуляции

ции спинного мозга устанавливают в межпозвонокое пространство между С5-С6 позвонками (шейный отдел), между Т11-Т12 (грудной отдел) и/или между Т12-Л1 позвонками (поясничный отдел). Индифферентные электроды располагают симметрично на гребнях подвздошных костей справа и слева.

3. Индивидуально подбирают режим механостимуляции. Предпочтительной является программа активных поочередных шагательных движений правой и левой ног с вовлечением в движение голеностопных суставов. Возможен режим активного движения одной ноги с координацией с пассивным движением другой ноги, а также пассивное движение обеих ног. Амплитуду движений в суставах и частоту движений подбирают индивидуально. Объясняют (демонстрируют) пациенту, что при возникновении контрактуры в одной из ног механостимуляция сразу же останавливается.

4. Производят стимуляцию по каждому из стимулирующих электродов, плавно увеличивая интенсивность импульсов от нуля до той, которую пациент может комфортно переносить (амплитуда тока – в диапазоне 40...200 мА). Для стимуляции выбирают субмаксимальную переносимую интенсивность стимула. Если пациент не ощущает воздействия, то увеличивают интенсивность стимула до появления сокращения в мышцах ног. Если сокращение не возникает при воздействии максимальным током, то выбирают для дальнейшей стимуляции максимальный ток. Частота ЧССМ – 30 Гц по каждому из электродов. Если у пациента значительно выражена мышечная спастика, то выбирают частоту стимуляции 5 Гц или ниже; чем значительнее выражена спастика, тем ниже частота воздействия.

5. Объясняют пациенту задачу, которую он должен выполнять с использованием БОС: наблюдая за изображением на мониторе (или ориентируясь на звуки в наушниках), отслеживать силы сгибания и разгибания правой и левой ног в целом, а также эти силы для голеностопных суставов каждой из ног. Медицинский персонал контролирует состояние пациента по внешнему виду, частоте сердечных сокращений, величине артериального давления, электрокардиограмме и/или иными способами с помощью внешних устройств. Длительность отдельной процедуры, а также длительность и интенсивность курса процедур могут быть различными. Один из предпочтительных вариантов: длительность процедуры нарастает от 5 до 60 мин в течение курса, интенсивность курса – 5...6 процедур в неделю, длительность курса – 2...4 недели и более (параметры подбираются индивидуально). Режимы воздействия могут быть изменены при изменении состояния пациента.

Опыт использования комплекса в реабилитации движений

В исследовании принимало участие 20 пациентов с параличами вертеброгенной этиологии разной тяжести в возрасте 16...57 лет. Контроль неврологического статуса больных осуществляли по шкалам Frankel, ASIA, Ashworth; реабилитационного статуса – по шкале функциональной независимости Бартелла. Пациенты получали от 5 до 15 процедур. Метод и результаты подробно описаны в отчете по ОКР «Разработка аппаратно-программного комплекса для чрескожной электростимуляции спинного мозга и механотерапии для реабилитационного лечения пациентов с вертебро-спинальной патологией» в рамках госконтракта с Минобрнауки РФ № 16.522.11.2009 от 10 мая 2012 г.

После однократной процедуры у 4 из 5 пациентов наблюдалось уменьшение времени прохождения дистанции при тетрапедальной ходьбе (на 10...25 %), причем эффект наблюдался при передвижении вперед и назад. При бипедальной ходьбе укорочение времени наблюдалось только у 1 пациента, при этом время сокращалось лишь на 5...10 %, у остальных пациентов увеличение и укорочение времени чередовалось. Удлинение времени прохождения контрольного теста совпадало с утомлением после произвольных усилий на аппарате механотерапии. У абсолютного большинства пациентов (6 из 7) наблюдалось снижение времени выполнения локомоторных тес-

тов к концу курса стимуляции в сравнении с тестированием до начала лечения. При тетрапедальной ходьбе время сокращалось у всех тестированных пациентов (5 из 5), разница составила 10...30 %. При бипедальной ходьбе у 3 из 4 произошло снижение в среднем на 15 %. По-видимому, выявленные различия связаны с тем, что тетрапедальная ходьба, осуществляемая при низком центре масс и большей площади опоры, в значительной степени отражает локомоторные возможности пациентов, тогда как бипедальная ходьба зависит еще и от техники передвижения с дополнительной опорой и способности поддерживать баланс тела. У 3 пациентов отмечено улучшение контроля мочеиспускания (по шкале Бартелла). Ухудшений не выявлено ни в одной из сфер повседневной жизнедеятельности.

Заключение

Способ реабилитационного лечения пациентов с вертебро-спинальной патологией при механотерапии конечностей и ЧССМ отличается тем, что для повышения эффективности реабилитации дополнительно задействован механизм БОС, а именно: пациенту демонстрируют интенсивности воздействия двигателей механотренажера и воздействия самого пациента, совместно приводящие к перемещению стоп и/или к их поворотам, стимулируя пациента к контролю собственного вклада в совершаемые движения с целью поддержания или увеличения этого вклада. Описанный комплекс может обеспечить реабилитацию пациентов с нарушениями движений в условиях лечебных, лечебно-профилактических и научно-исследовательских медицинских учреждений или в домашних условиях; он получил высокую оценку специалистов. Основные технические решения защищены патентами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013-2020 годы (ГП-14, раздел 63).

Список литературы:

1. Гришин А.А., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р. и др. Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры. Концептуальные и медико-биологические основы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 37-45.
2. Chernikova L., Umarova R., Domashenko M. et al. The early activation of patients with acute ischemic stroke using tilt-table «Erigo»: The prospective randomized blinded case-control study // Neurorehabil. Neural. Repair. 2008. Vol. 22. PP. 556-557.
3. Проказова П.Р., Пирадов М.А., Рябинкина Ю.В. и др. Роботизированная механотерапия с использованием тренажера MOTomed letto2 в комплексной ранней реабилитации больных с инсультом в отделении реанимации и интенсивной терапии // Анналы неврологии. 2013. Т. 7. № 2. С. 11-15.
4. Harkema S., Gerasimenko Yu., Hodes J. et al. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: A case study // Lancet. 2011. Vol. 377. PP. 1938-1947.
5. Герасименко Ю.П., Городничев Р.М., Щербакова Н.А. и др. Способ электрической стимуляции спинного мозга / Патент РФ № 2471518 на изобретение, 2011.
6. Герасименко Ю.П., Городничев Р.М., Мошонкина Т.Р. и др. Способ накожной электростимуляции спинного мозга / Патент РФ № 2529471 на изобретение, 2012.
7. Gerasimenko Y., Kozlovskaya I., Edgerton V.R. Sensorimotor regulation of movements: Novel strategies for the recovery of mobility // Human Physiology. 2016. Vol. 42. № 1. PP. 106-117.
8. Courtine G., Gerasimenko Yu., van den Brand R. et al. Transformation of nonfunctional spinal circuits into functional states after the loss of brain input // Nature Neuroscience. 2009. Vol. 12. № 10. PP. 1333-1342.

9. Герасименко Ю.П., Макаровский А.Н., Назаров А.М. Тренировочный комплекс для восстановления двигательной активности ног / Патент РФ № 56178 на полезную модель, 2006.
10. Мошонкина Т.Р., Макаровский А.Н., Богачева И.Н. и др. Эффекты электрической стимуляции спинного мозга у пациентов с вертебро-спинальной патологией // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2012. Т. 153. № 1. С. 21-26.
11. Lunenburger L., Colombo G., Riener R., Dietz V. Biofeedback in gait training with the robotic orthosis Lokomat / Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE, 2004. Vol. 2. PP. 4888-4891.
12. Zimmerli L., Duschau-Wicke A., Riener R. et al. Virtual reality and gait rehabilitation Augmented feedback for the Lokomat / Virtual Rehabilitation International Conference. 2009. PP. 150-153.
13. Brucker B.S., Buylaeva N.V. Biofeedback effect on electromyography responses in patients with spinal cord injury // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 1996. Vol. 77. № 2. PP. 133-137.
14. Petrofsky J.S. The use of electromyogram biofeedback to reduce Trendelenburg gait // Eur. J. Appl. Physiol. 2001. Vol. 85. PP. 491-495.
15. Гришин А.А., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р. Способ и комплекс для реабилитационного лечения пациентов с вертебро-спинальной патологией путем чрескожной электро-стимуляции спинного мозга, механотерапии и биологической обратной связи / Патент РФ 2014139648 на изобретение, 2012.

Александр Алексеевич Гришин,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
лаборатория физиологии движений,
ФГБУН «Институт физиологии
им. И.П. Павлова» РАН,
технический директор,
ООО «Косима»,
Татьяна Ромульевна Мошонкина,
д-р биол. наук, ст. научный сотрудник,
лаборатория физиологии движений,
ФГБУН «Институт физиологии
им. И.П. Павлова» РАН,
ведущий специалист,
ООО «Косима»,
Елена Вадимовна Боброва,
д-р биол. наук, ведущ. научный сотрудник,
лаборатория физиологии движений,
ФГБУН «Институт физиологии
им. И.П. Павлова» РАН,
Юрий Петрович Герасименко,
чл.-корр. РАН,
д-р биол. наук, зав. лабораторией,
лаборатория физиологии движений,
ФГБУН «Институт физиологии
им. И.П. Павлова» РАН,
научный руководитель,
ООО «Косима»,
г. С.-Петербург,
e-mail: grishin-ckb@yandex.ru

Н.А. Базаев, В.М. Гринвальд, С.В. Селищев

Моделирование процессов искусственного очищения крови в биотехнической системе автоматизированного перитонеального диализа с регенерацией

Аннотация

Проведен анализ процессов массопереноса и предложено математическое описание массообмена между интра- и экстракорпоральными контурами биотехнической системы низкопоточной интракорпоральной детоксикации организма с перманентной регенерацией раствора для перитонеального диализа.

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений разработки технических средств для заместительной почечной терапии является создание носимой аппаратуры искусственного очищения крови для больных с хронической почечной недостаточностью в терминальной стадии.

В [1]-[3] предложена модель биотехнической системы (далее – БТС) низкопоточной интракорпоральной детоксикации организма с экстракорпоральной перманентной регенерацией раствора для перитонеального диализа.

Перитонеальный диализ (далее – ПД) основан на диффузионном, фильтрационном и конвективном переносах через брюшину низко- и среднемолекулярных соединений и жидкости в раствор для перитонеального диализа (далее – РПД), находящийся в полости брюшины [1], [4].

При ПД с экстракорпоральной перманентной регенерацией РПД (рис. 1) массообмен между интра- и экстракорпоральными контурами может быть представлен следующим равенством:

$$\frac{dJ_{B_i}^{кп}}{dt} = \frac{dJ_{B_i}^{рпд}}{dt} = \frac{dJ_{B_i}^а}{dt}, \quad (1)$$

полученным на основе материального баланса при использовании ММУ, обеспечивающего элиминацию низко- и средне-

молекулярных веществ, и при условии, что

$$K_{B_i}^{пм} \geq K_{B_i}^{мму}, \quad (2)$$

где $J_{B_i}^{кп}$ – поток вещества B_i в крови (управляемой среде $\Phi_{бр}$); $J_{B_i}^{рпд}$ – поток вещества B_i в РПД (управляющей среде); $J_{B_i}^а$ – поток вещества B_i в диализате; t – длительность ПД с регенерацией РПД; $K_{B_i}^{пм}$ – клиренс перитонеальной мембраны по веществу B_i ; $K_{B_i}^{мму}$ – клиренс ММУ по веществу B_i .

Диффузионный механизм переноса при ПД определяется в основном концентрационным градиентом между кровью и РПД, молекулярной массой веществ и проницаемостью перитонеальной мембраны. Изменение вязкости крови и скорости кровотока по капиллярам брюшины практически не влияет на клиренс удаляемых веществ [5].

При ПД поток вещества B_i через перитонеальную мембрану включает в себя низко- и среднемолекулярные (с молекулярной массой от 500 до 5000 дальтон [6]) органические продукты обмена веществ – метаболиты (например мочевины, креатинин, мочевую кислоту и другие уремиические токсины), неорганические соединения, многие из которых являются ионными электролитами [7], а также воду. По данным [8], через большие поры перитонеальной мембраны в РПД также проникают крупные молекулы белков, но их количество невелико.