

## Опыт проектирования реабилитационных экзоскелетов

### Аннотация

Рассматриваются вопросы программно-технической реализации экзоскелетов, обеспечивающих устойчивую походку пациентов, а также регистрацию и анализ электрофизиологической информации, позволяющей определять динамику состояния организма в процессе реабилитации.

### Введение

К одному из эффективных способов реабилитации больных с повреждением опорно-двигательного аппарата относят применение индивидуальных экзоскелетов, позволяющих поддерживать сложные виды движения пациентов: вертикализацию, приседание, ходьбу и т. д.

На первом этапе работ в этом направлении в Юго-Западном государственном университете (ЮЗГУ) под руководством и при активном участии авторов был разработан экзоскелет, выполняющий вертикализацию пациентов. Описание структуры такого типа экзоскелета и принципов устойчивого управления достаточно подробно приведено в работах [1], [2]. С целью минимизации рисков для ослабленного организма пациента в контур управления приводами экзоскелета включены приводы контроля ряда электрофизиологических показателей (электрокардиограмма и артериальное давление).

Результаты обработки регистрируемой электрофизиологической информации передаются врачу для последующего анализа и принятия решений, а также используются для управления сервоприводами подъемных механизмов с помощью контура биотехнической обратной связи. Это позволяет при необходимости либо остановить вертикализацию, либо изменить ее скорость.

На втором этапе исследований был поставлен вопрос о разработке экзоскелетов с устойчивой походкой и повышении качества контроля функционального состояния и состояния здоровья пациентов с целью повышения эффективности реабилитационного процесса.

Анализ известных решений показал, что в мировой практике наибольшее распространение получили устройства, реализованные с применением комбинированной схемы организации движения, когда для удержания равновесия пациента в экзоскелете используются костыли. К таким устройствам относятся экзоскелеты типа «Eksso Bionics», «EkoAtlet» и др., созданные в ряде стран [1], [3].

Однако этот способ передвижения требует серьезной физической подготовки пациента, развитых рук и существенно ограничивает удобство перемещения. Движение пациента в экзоскелете с сохранением устойчивости вертикального положения без костылей и других вспомогательных средств на сегодняшний день реализовано только в одном экзоскелете, созданном компанией «REX Bionics». С помощью «REX Bionics» возможна реализация процесса вертикализации пациента, ходьбы по прямой вперед и назад, поворот, подъем по лестнице.

Целью исследований, проводимых в ЮЗГУ, является создание отечественного экзоскелета с устойчивой походкой без использования вспомогательных средств и с расширенными функциональными возможностями в реализации реабилитационного процесса [4]-[6].

### Система управления устойчивой походкой экзоскелета

При проектировании системы управления экзоскелетом, обеспечивающим вертикальную походку, мы исследовали три основных решения:

- 1) управление при медленном движении, при котором силы инерции, вызванные ускоренным движением звеньев экзоскелета, малы по сравнению с силами веса;
- 2) движение экзоскелета с ускорением по ровной поверхности, при котором необходимо учитывать не только нормальные реакции, но и силы трения;
- 3) движение экзоскелета по неровной поверхности, когда не все датчики, используемые для оценки нормальных реакций, могут соприкоснуться с опорной поверхностью.

Для решения задачи устойчивого управления экзоскелетом использовались метод и точки нулевого момента (ZMP), определяемые по М. Вукобратовичу [7].

Центр масс экзоскелета (ЦМЭ) и ZMP являются виртуальными точками, положение которых в пространстве можно определить только расчетными методами на основе кинематического для ЦМЭ и динамического для ZMP анализа. Положение этих точек внутри опорной поверхности позволяет оценить запас устойчивости (ЗУ) экзоскелета. Расположение ЦМЭ или ZMP в центре опорной поверхности обеспечивает максимальный ЗУ. Чем ближе ЦМЭ или ZMP расположены к границе опорной поверхности, тем, очевидно, выше вероятность потери устойчивости экзоскелета и соответственно ниже запас устойчивости.

В ходе проведенных исследований нами были получены аналитические выражения для определения запаса устойчивости с учетом нормальных реакций и силы трения и предложена схема расположения датчиков давления на стопе для определения нормальных реакций  $N_p$ , которые обеспечивают расчет устойчивого состояния экзоскелета на ровной поверхности (рис. 1а).

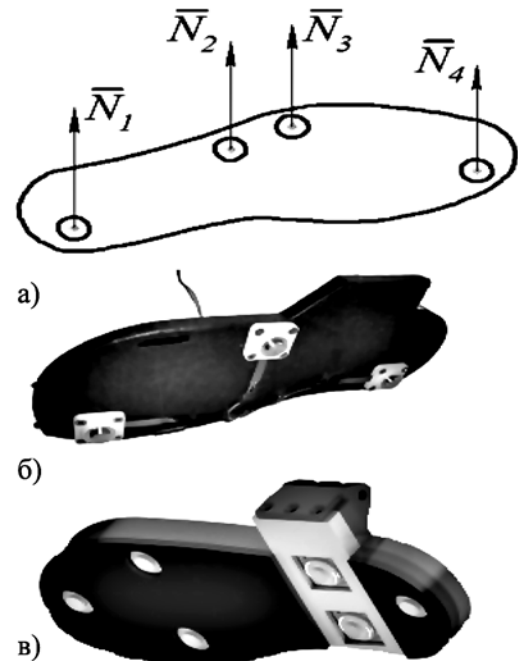


Рис. 1. Общий вид стопы: а) схема расположения датчиков давления, установленных на стопах с изображением нормальных реакций; б) деформируемая стопа; в) «плавающая» стопа

Для обеспечения устойчивости при ходьбе по неровной поверхности необходимо применение особой конструкции подвеса гибкой, или деформируемой, стопы (рис. 1б). Возможно применение «плавающей» стопы, адаптивно приспосабливающейся к профилю дорожного покрытия (см. рис. 1в). Версия «гибкая стопа» включает в себя многослойную композитную структуру подошвы, что позволяет задействовать мышцы стопы, сделав походку более естественной.

Кроме датчиков нормальной реакции и сил трения, для устойчивой походки экзоскелет должен быть оснащен средствами локальной навигации, позволяющими высокоточно определить расстояние от стопы до опорной поверхности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях (рис. 2а и б).

Обобщенная схема управления устойчивой походкой экзоскелета представлена на рис. 3.

Для решения задач устойчивого управления измерительная подсистема (рис. 3) содержит видеокамеру 1; датчики угла поворота 2; датчики давления 3; инерциальную навигационную систему, реализованную на IMU-модуле, 4; дальнометры 5.

Схема управления устойчивой походкой экзоскелета оснащена системой обработки данных, поступающих с измерительных устройств, интеллектуальной системой принятия решений.

Для управления сервоприводами соответствующие сигналы усиливаются усилителями мощности (УМ). Применение такой системы обработки данных позволяет экзоскелету совместно с пациентом или без его участия взаимодействовать с окружающей средой, планировать траекторию движения с учетом информации о препятствиях и других факторах, влияющих на устойчивость движения пациента. Кроме того, предусматривается возможность менять параметры движения в зависимости от состояния человека через подсистему мониторинга состояния человека.

#### Подсистема мониторинга состояния человека

При выборе технических средств для мониторинга состояния человека, проходящего реабилитацию с помощью шагающего экзоскелета, учитывалось, что основное его назначение – это работа с пациентами, страдающими инсультами, травмами нижних конечностей и позвоночника, ДЦП, ишемическим синдромом нижних конечностей и синдромом диабетической стопы.

Для этих классов заболеваний важными показателями, характеризующими состояние пациента, являются: кровообращение, мышечная активность пораженных органов и систем, функциональное состояние и функциональный резерв.

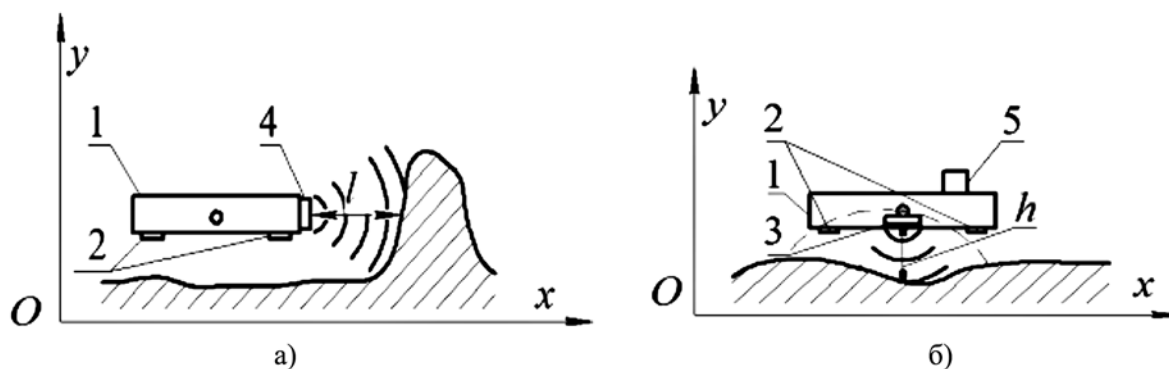


Рис. 2. Схемы взаимодействия дальнометров с опорной поверхностью: а) горизонтального; б) вертикального; 1 – корпус стопы; 2 – датчик давления; 3 – вертикальный УЗ-дальнометр; 4 – горизонтальный УЗ-дальнометр; 5 – инерционное измерительное устройство

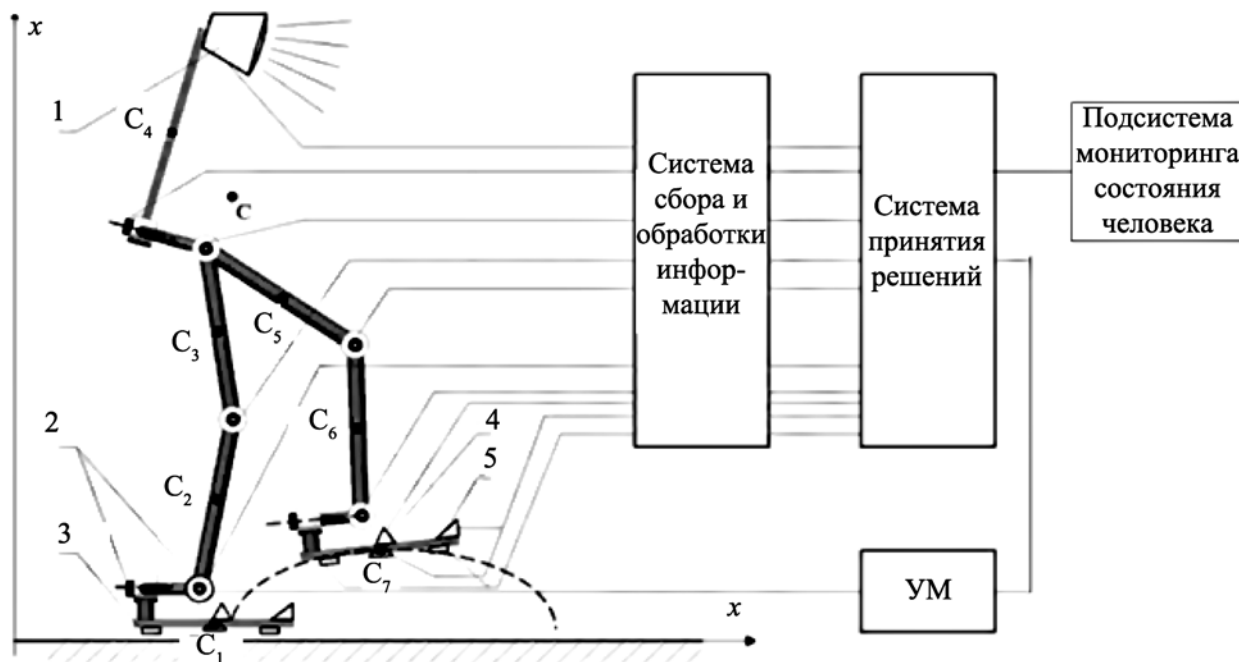


Рис. 3. Схема управления походкой экзоскелета

Дополнительными техническими условиями следует считать то, что создаваемая аппаратура должна обладать малыми габаритами, малым потреблением энергии, по возможности не мешать пациенту, но при этом обладать необходимыми вычислительными и функциональными ресурсами.

С учетом сформулированных требований и ограничений было принято решение разместить на борту экзоскелета многоканальный реограф, миограф, электрокардиограф, автоматический измеритель артериального давления, фотоплетизмограф и измеритель биоимпеданса биологически активных точек, «связанных» с исследуемыми органами и системами.

Анализ рынка микросхем медицинского назначения позволил определить конкретный состав микрочипов для проектируемой системы.

Для регистрации реограмм (от головного мозга до пальцев нижних конечностей) была выбрана многоканальная микросхема AFE 4300, предназначенная для сканирования импеданса тела человека. Регистрация миограмм может осуществляться практически всей линейкой AFE-микрочипов, ориентированных на электрокардиосигнал и электроэнцефалографию. В рассматриваемой работе для миографии был выбран восьмиканальный микрочип ADS 1299, а для регистрации ЭКГ – микросхема ADAS 1000.

Кроме того, ADAS 1000 позволяет контролировать систему дыхания и качество крепления электродов. Специально для регистрации фотоплетизмограмм с расчетом сатурации (насыщения кислородом) крови выпускается микросхема AFE 4490.

Для регистрации артериального давления используются управляющие и вычислительные ресурсы типового микроконтроллера, а регистрацию сопряжения контролируемых биологически активных точек целесообразно осуществлять многоканальным измерителем AD5933.

С учетом выбранной элементной базы структура подсистемы мониторинга состояния человека, контактирующего с экзоскелетом, имеет вид, представленный на рис. 4.

В силу достаточно большого объема информации, считываемой с пациента для предварительной обработки данных, используются две микросхемы: прецизионного микрочипа,

ориентированного на регистрацию и обработку данных с биообъектов от пассивных (PS) и активных (протоколы SPI, UART, I2C, I2S, GPIO) сенсоров – ADuCM 350, и прикладной процессор OMAP-L138.

Настройка всех активных сенсоров осуществляется с использованием платформ разработчиков. Использование двух светодиодов (красный, инфракрасный) в фотоплетизмографе (AFE 4490) позволяет вычислять величину сатурации крови. В измерителе артериального давления управление манжетой осуществляется битами программно-управляемого интерфейса GPIO через усилители У1 и У2. Напряжение с датчика давления (P/U), содержащее информацию об измеряемом давлении и тоне Короткова, усиливается операционным усилителем ОУ и подается на вход пассивных датчиков (PS) микросхемы ADuCM350, в которой оцифровывается встроенным АЦП и фильтруется внутренними цифровыми фильтрами с расчетом величин систолического и диастолического давления.

Активные сенсоры для регистрации реограмм (AFE 4300), электромиограмм (ADS 1299), ЭКГ (ADAS 1000), фотоплетизмограммы на двух длинах волн (AFE 4490) с многофункциональным интерфейсом ADuCM 350 и прикладным процессором OMAP-L138 взаимодействуют по стандартным четырехпроводным интерфейсам SPI. Измеритель биологически активных точек (БАТ) с ADuCM 350 взаимодействует по двухпроводному интерфейсу I2C. Управление работой подсистемы осуществляется блоком клавиатуры (БК) через интерфейс UART. Через интерфейс этого типа ADuCM 350 взаимодействует с прикладным процессором. Результаты измерений могут записываться на внешнюю Flash-память. Управляющая информация об изменении режимов работы экзоскелета передается в систему принятия решений через интерфейс I2C.

Прикладной процессор производит расчет показателей контролируемых сосудов по реоплетизмограмме, рассчитывает ЧСС и показатели variability сердечного ритма, определяет насыщение крови кислородом (сатурацию крови), электрические характеристики БАТ контролируемых органов и дает заключение об их состоянии, рассчитывает величины систолического и диастолического давления.

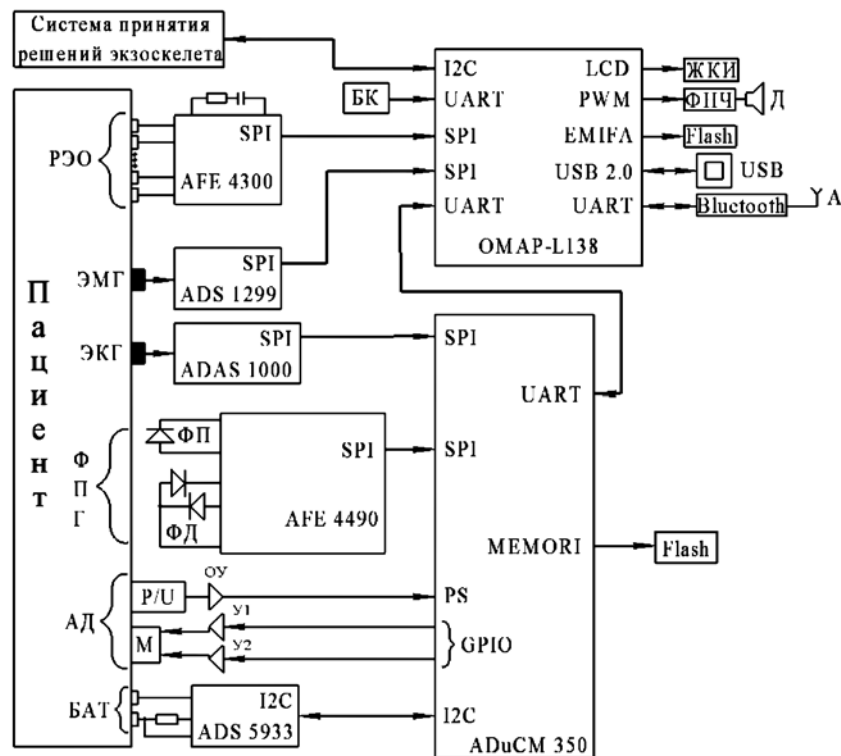


Рис. 4. Структурная схема подсистемы мониторинга состояния человека, контактирующего с экзоскелетом

Решение об управлении экзоскелетом осуществляется в соответствии с системой уравнений вида

$$UF_k = f_k(\text{BCP}, \text{САД}, \text{ДАД}, YP, YU, FR), \quad (1)$$

где BCP – параметры variability сердечного ритма; САД – систолическое артериальное давление; ДАД – диастолическое артериальное давление; YP – уровень психоэмоционального напряжения;  $k$  – номер управляемого сервопривода экзоскелета; YU – уровень утомления; FR – функциональный резерв. Показатели YP, YU и FR определяются по оригинальным авторским методикам [8]-[12].

Наряду с параметрами управления экзоскелетом, прикладной процессор формирует текстовые файлы, содержащие рекомендации о рациональных схемах оказания врачебной помощи, и при необходимости сообщает о критических ситуациях.

Эта часть программного обеспечения использует системы гибридных нечетких решающих правил, синтезированных в соответствии с рекомендациями [13]-[15].

Информация о состоянии человека, контактирующего с экзоскелетом, режимах работы экзоскелета, а также файлы схем управления состоянием здоровья и прочая информация отображаются на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) или передаются голосом через динамик (Д), подключаемый через фильтр низких частот (ФНЧ) к аудиоконтроллеру прикладного процессора. Связь с другими вычислительными ресурсами осуществляется через порт USB и радиомодуль Bluetooth.

## Заключение

В ходе проведенных исследований был разработан экзоскелет с локальной навигацией, а также математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, управляющие устойчивой походкой. С использованием прототипа экзоскелета были проведены испытания, показавшие уверенную, устойчивую походку разработанной системы.

Подсистема мониторинга состояния человека в оперативном режиме формирует массив медицинской информации, позволяющий следить за состоянием здоровья и функциональным состоянием человека, проходящего реабилитацию с использованием экзоскелета, и формировать рекомендации по выбору рациональных схем профилактики и лечения.

*Исследования, представленные в работе, проведены при поддержке РНФ, проект № 14-39-00008.*

## Список литературы:

1. Яцун С.Ф., Павловский В.Е., Лушников Б.В., Емельянова О.В., Яцун А.С., Савин С.И., Ворочаев А.В. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования. Монография. – Курск: ЮЗГУ, 2014. 148 с.
2. Пановко Г.Я., Савин С.И., Яцун С.Ф., Яцун А.С. Моделирование процессов вставания экзоскелета из положения сидя // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 19-24.
3. Яцун С.Ф., Савин С.И., Емельянова О.В., Яцун А.С., Турлапов Р.Н. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования. Монография. – Курск: ЮЗГУ, 2015. 178 с.
4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation / Proceedings of the 5th International Workshop on Medical and Service Robots. Graz, Austria, July 4-6, 2016. PP. 54-58.

5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences / Proceedings of 21st CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. Udine, Italy, June 20-23, 2016. PP. 361-368.
6. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position. – Advances in Robot Design and Intelligent Control. Springer International Publishing, 2016. PP. 165-172.
7. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. Монография / Пер. с англ. А.Ю. Шнейдера; под ред. В.С. Гурфинкеля. – М.: Мир, 1976. 544 с.
8. Корневский Н.А., Коростелев А.Н., Стародубцева Л.В., Серебровский В.В. Метод оценки функционального резерва человека-оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода // Биотехносфера. 2012. № 1 (19). С. 44-49.
9. Корневский Н.А., Лукашов М.И., Чурсин Г.В. Нечеткая оценка роли физического утомления в рецидиве хронических заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009. Т. 8. № 3. С. 692-696.
10. Корневский Н.А., Шуткин А.Н., Горбатенко С.А., Серебровский В.В. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. 472 с.
11. Korenevskiy N.A., Al-Kasasbeh R.T., Ionescu F., Alshamasin M., Smith A.P. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional // IFMBE Proceedings. 2013. Vol. 40. PP. 213-216.
12. Korenevskiy N.A., Al-Kasasbeh R.T., Ionescu F., Alshamasin M., Al-Kasasbeh E., Smith A.P. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional / Mega-conference on Biomedical Engineering. Proceedings of the 4th International Conference of the Development of Biomedical Engineering. Ho Chi Minh City, January 8-12, 2012. PP. 354-357.
13. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33-35.
14. Корневский Н.А., Руцкой Р.В., Долженков С.Д. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких правил // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2013. Т. 12. № 1. С. 905-909.
15. Корневский Н.А., Крупчатников Р.А., Горбатенко С.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2008. № 1. С. 18-24.

Сергей Федорович Яцун,  
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,  
Андрей Сергеевич Яцун,  
канд. техн. наук, ст. преподаватель,  
кафедра механики, мехатроники  
и робототехники,  
Николай Алексеевич Корневский,  
д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой биомедицинской инженерии,  
Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск,  
e-mail: teormeh@inbox.ru