

ляется практическое применение предлагаемого подхода для приложений, которые используют алгоритмы классификации движения глаз для управления движущимся объектом, а именно роботизированной инвалидной коляской.

Список литературы:

1. Петрунина Е.В., Истомина Т.В., Копылова Е.В. и др. Исследовательская кибер-биофизическая система для когнитивной адаптации лиц с ОВЗ // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 7. С. 68.
2. Nikolsky A.E., Petrunina E.V., Istomina T.V. Modern methods and means of rehabilitation and social adaptation (Physical and rehabilitation medicine). – LAMBERT Academic Publishing, 2019.
3. Istomina T.V., Petrunina E.V. et al. A system of the processing, monitoring of results and biofeedback training // Information Technology in Medical Diagnostics III Metrological Aspects of Biomedical Research. – London, UK: Taylor & Francis Group, 2021.
4. Kar A. MLGaze: Machine Learning-Based Analysis of Gaze Error Patterns in Consumer Eye Tracking Systems // Vision. 2020. № 4 (2). P. 25.
5. Domik G.O. The role of visualization in understanding data / Lecture notes on computer science «New trends and result in computer». – Springer Verlag, 1993.
6. Зильбер А.П. Медицина критических состояний: общие проблемы. – Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1995. 360 с.
7. Kaufman A.E., Nielson G.M., Rosenblum L.J. The visualization revolution // IEEE Comp. Graph. & Appl. 1993. Vol. 13. № 4. PP. 16-17.
8. Официальный сайт «Wearable Technologies» / <https://www.wearable-technologies.com/2021/10/mason-unveils-the-first-ever-customizable-smartwatch-for-patient-monitoring-hospitality-or-safety/> (дата обращения: 25.04.2022 г.).

9. Официальный сайт «Нейроботикс» / <https://neuroassist.tech/nejgorlej-8s/> (дата обращения: 22.04.2022 г.).

10. Модель нейрогарнитуры. Официальный сайт «Нейроботикс» / <https://neuroassist.tech/neuroplay-8c-pro/> (дата обращения: 22.04.2022 г.).

Татьяна Викторовна Истомина,
д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник,
центр сопровождения научных исследований,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»,
г. Пенза,
профессор,
кафедра основ радиотехники,
НИУ «Московский энергетический институт»,
Елена Валерьевна Петрунина,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра «Информатика
и информационные технологии»,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет»,
Елена Владимировна Копылова,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
НИУ «Московский энергетический институт»,
Эльмин Вагифович Байрамов,
канд. педагог. наук, доцент,
кафедра «Информатика
и информационные технологии»,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет»,
г. Москва,
e-mail: istom@mail.ru

С.М. Яцун, А.С. Яцун, А.Н. Рукавицын

Разработка подходов к созданию медицинского мехатронного подъемника для перемещения маломобильных пациентов

Аннотация

Описаны подходы к разработке вспомогательного медицинского устройства для подъема и перемещения пациентов с ограниченными физическими возможностями. Описана методика расчета мехатронного привода медицинского подъемника, приведены результаты численного моделирования динамического поведения исполнительного органа разрабатываемого устройства.

Введение

В современных условиях эффективность процесса реабилитации и качественного ухода за маломобильными пациентами требует не только наличия соответствующих средств, например медицинских экзоскелетов, но и применения вспомогательных технических устройств, облегчающих работу медицинских работников. Уход за маломобильными пациентами сопровождается чрезмерной физической нагрузкой для обслуживающего персонала, поскольку во время работы приходится поднимать, перемещать пациента, находиться в вынужденной позе в течение длительного времени и, как следствие, подвергать большим нагрузкам опорно-двигательный аппарат (ОДА) и особенно позвоночник [1]-[3]. Боли в спине, которые ощущают медицинские сотрудники, выполняющие работы по перемещению не способных к самостоятельному передвижению пациентов, становятся «эпидемией здравоохранения». Такие нагрузки влекут за собой рост заболеваемости ОДА у сотрудников, а травматизм в медицине становится выше, чем в остальных отраслях труда [4].

До последнего времени физическим нагрузкам, которые испытывают медицинские сестры лечебно-профилактических учреждений, не придавалось должного значения. Особенно велики нагрузки у персонала, работающего с пациентами, лишенными возможности передвигаться самостоятельно. Для минимизации риска нанесения ущерба своему здоровью в процессе реализации трудовой деятельности сотрудники должны использовать специальные вспомогательные средства для перемещения пациентов.

Материалы и методы

Под перемещением пациента следует понимать комплекс мероприятий по безопасной как для пациента, так и для медперсонала перемещению положения первого в пространстве. Основными причинами возникновения болей в позвоночнике у медперсонала при выполнении данных операций являются подъем неадекватно тяжелого груза и нарушение эргономики перемещения пациента. Транспортировка и уход за лицами с ограниченными физическими возможностями всегда сопряжены с определенными рисками и возлагают на медицинский

персонал дополнительную физическую нагрузку. Поэтому, когда это необходимо, медработник, осуществляющий уход, должен использовать средства технического сопровождения [5], [6].

Специальные средства перемещения больных, не способных передвигаться самостоятельно, – медицинские подъемники. Они позволяют относительно легко и быстро переместить пациента в экзоскелет, посадить в инвалидное кресло, положить в кровать, помочь принять ванну и т. п. [7]. Разработка устройств, облегчающих труд медицинских работников, а также наиболее оптимальных алгоритмов движения в ходе выполнения медицинских манипуляций осуществляются на основе принципов медицинской эргономики.

Конструктивно медицинские подъемники устроены по принципу подъемного крана и обычно состоят из П-образного основания, подъемной мачты-стрелы, оснащенной специальным приводом (см. рис. 1). Пациент размещается в гамаке на специальном подвесе, который может перемещаться вверх-вниз. Такие подъемники могут быть передвижными (перемещаются на транспортных колесах) и стационарными, которые крепятся к стене или полу. Исходя из типа подъемного механизма, различают гидравлические и электрические (электро-механические) подъемники. Также существуют подъемники с функцией вертикализатора, которые могут использоваться для транспортировки пациентов и при проведении лечебной физической культуры для нижних конечностей на этапе реабилитации.



Рис. 1. Медицинский подъемник

Медицинский подъемник должен не только улучшать условия труда медицинского персонала, но и обеспечивать комфортные перемещения самих маломобильных пациентов. При разработке новых современных конструкций медицинский подъемник следует рассматривать как мехатронную систему (МС), выполняющую реализацию заданного движения. При этом задачей управления МС является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Использование мехатронных подходов при проектировании медицинского электроподъемника требует исследования его динамических характеристик. При этом подъемник можно рассматривать как МС с поступательным и вращательным движениями звеньев. В данном случае подъемник представляет собой электромеханическую управляемую систему, оснащенную тросовым приводом, расчетная схема которой представлена на рис. 2. Данная система включает в себя электродвигатель (ЭД), вращение вала которого преобразуется посредством передаточного механизма, состоящего из зубчатого колеса 1 и моноблока «шестерня-шкив» 2, в поступательное движение груза 3, находящегося в специальном гамаке на гибком подвесе. Система управления (САУ) обрабатывает сигнал, поступающий с датчика скорости S, обеспечивая требуемые параметры движения.

Для разработки динамической модели представленной системы воспользуемся уравнением Лагранжа II рода [8]. При-

няв за обобщенную координату ϕ системы угол отклонения от положения покоя колеса 1, имеем

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = Q, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; Q – обобщенная сила.

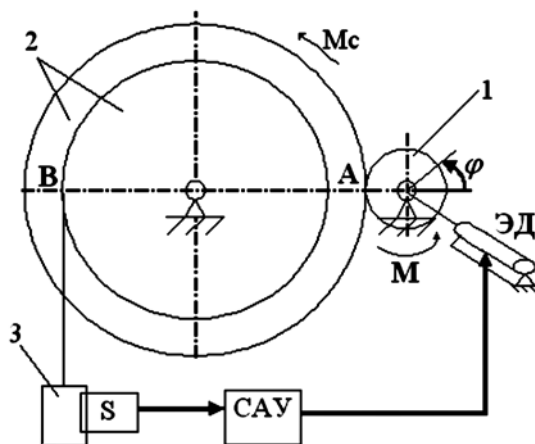


Рис. 2. Расчетная схема электромеханического привода МС (описание элементов – в тексте статьи)

Кинетическая энергия системы будет равна сумме кинетических энергий всех тел, входящих в рассматриваемую систему, т. е.

$$T = T_1 + T_2 + T_3. \quad (2)$$

Выражая скорости всех тел системы через скорость тела 1 и обозначив ее как $\dot{\phi}$, получим

$$\omega_2 = \dot{\phi} \frac{R_1}{R_2}$$

(так как $v_A = \dot{\phi} \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2$);

$$v_3 = v_B = \dot{\phi} \cdot r_2 \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

Считая колеса 1 и 2 сплошными однородными дисками, определим моменты инерции колес относительно осей вращения:

$$J_1 = \frac{m_1 R_1^2}{2}; \quad J_2 = \frac{m_2 R_2^2}{2}.$$

Кинетическая энергия рассматриваемой системы

$$\begin{aligned} T &= \frac{J_1 \dot{\phi}^2}{2} + \frac{J_2 \dot{\phi}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_3^2}{2} = \\ &= \frac{\dot{\phi}^2}{2} \left(J_1 + J_2 \frac{R_1^2}{R_2^2} + m_3 r_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Частные производные кинетической энергии T

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) = \dot{\phi} \left(J_1 + J_2 \frac{R_1^2}{R_2^2} + m_3 r_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \right).$$

Обобщенную силу Q определим через работу A всех активных сил на элементарном перемещении $\delta\phi$. Учитывая, что $A = Q\delta\phi$, получим

$$\begin{aligned} Q &= \frac{M \delta\phi - M_c \delta\phi_2 - m_3 g \delta h}{\delta\phi} = \\ &= M - M_c \frac{R_1}{R_2} - m_3 g r_2 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Учитывая, что к колесу 1 приложен момент электродвигателя постоянного тока $M = a - b \cdot \phi$ (где постоянные a и b определяют характеристики электродвигателя), а к ведомому колесу 2 момент сил сопротивления M_c , принимая во внимание выражения (2)-(4), запишем уравнение (1) в виде

$$\ddot{\phi} \left(J_1 + J_2 \frac{R_1^2}{R_2^2} + m_3 r_2^2 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) = M - M_c \frac{R_1}{R_2} - m_3 g r_2 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

Решение данного дифференциального уравнения численным методом с применением современных программных средств позволяет получить динамические характеристики исполнительного органа исследуемой системы.

Специфика работы медицинского подъемника требует провести разработку алгоритма управления электродвигателем в режиме пропорционального регулирования, обеспечивающего плавную регулировку значения питающего напряжения. В данном режиме постоянная a электродвигателя изменяется на величину отклонения d реальной характеристики системы от планируемой, помноженную на некоторый коэффициент k , т. е. $a_{i+1} = a_i + kd$. В общем виде крутящий момент двигателя при пропорциональном регулировании можно представить как

$$M = -b\dot{\phi} \begin{cases} a + k_1 d \rightarrow \text{if } (v_{\text{пл}} > v_{\text{реал}}); \\ a - k_2 d \rightarrow \text{if } (v_{\text{реал}} > v_{\text{пл}} > v_k); \\ a - k_3 d \rightarrow \text{otherwise,} \end{cases}$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности, причем ($k_3 > k_2$); $d = |v_{\text{пл}} - v_{\text{реал}}|$; v_k – скорость при торможении.

Поскольку коэффициенты пропорциональности могут быть, по сути, любыми (в пределах возможностей двигателя), то исследовав поведение разрабатываемой системы при их различных значениях, примем за рациональные $k_1 = 0,3a$; $k_2 = 2,5a$; $k_3 = 7a$.

Регулировочные характеристики электропривода при указанных коэффициентах представлены на рис. 3.

Планируемая характеристика имеет вид, представленный на рис. 3а, с четырьмя характерными участками: разгон, рабочее (установившееся) движение, торможение и остановка. Ко-

эффициент пропорциональности может принимать различные значения в разные моменты времени. На последнем этапе движения – торможении необходимо наиболее точно воспроизвести скоростную характеристику, чтобы обеспечить требуемое позиционирование исполнительного органа медицинского подъемника. В соответствии с выбранным временем расчета $t_{\text{кон}}$ параметры планируемой скоростной характеристики электропривода медицинского подъемника подбирались таким образом, чтобы полностью исключить возможность травмирования перемещаемого пациента ($t_{\text{раз}} = 5$ с; $t_{\text{уст}} = 20$ с; $t_{\text{тор}} = 5$ с). При этом рабочая скорость движения подвеса $v_{\text{уст}}$ принималась на 20 % меньше значения установившейся скорости реальной характеристики v_1 .

Поскольку реальная система не может мгновенно отреагировать на изменение своих характеристик, управляющий момент (рис. 4а) воздействует на систему с некоторым запаздыванием по сравнению с сигналом, полученным с датчика обратной связи.

Результаты и обсуждения

Медицинские подъемники используются главным образом для ухода за пациентами, которые не могут самостоятельно менять свое положение в пространстве. Показаниями для перемещения пациента при помощи подъемника становятся особенности, которые не позволяют (или ограничивают) его самостоятельное перемещение (сердечная/дыхательная недостаточность, травмы и заболевания ОДА, выраженный болевой синдром и т. п.). Такие устройства могут использоваться для изменения положения и перемещения тела, а также в процессе реабилитации при терапевтической тренировке ходьбы.

Разработка подобных систем должна осуществляться на мехатронных принципах организации движения с соблюдением требований медицинской эргономики, которая определяет требования к разработке орудий труда, облегчающих труд медицинского персонала [9]. Следует учитывать, что критерии качества выполнения движения разрабатываемой вспомогательной медицинской системы являются проблемно-ориентированными. Динамические процессы, протекающие внутри

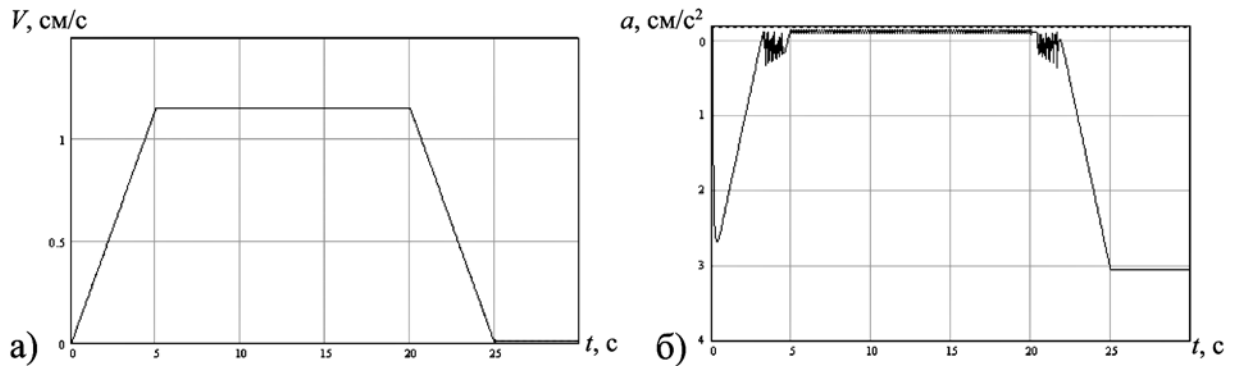


Рис. 3. Регулировочная скоростная характеристика (а) и ускорение (б) исполнительного органа при пропорциональном регулировании

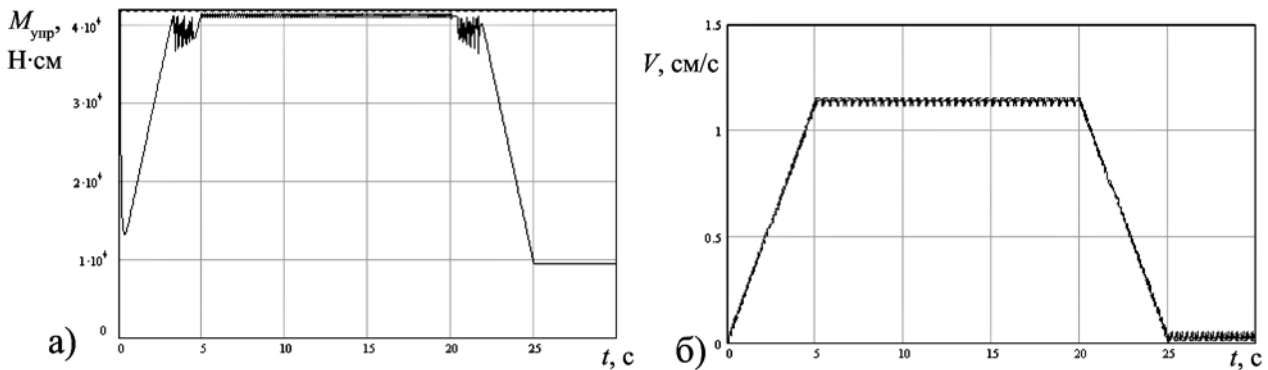


Рис. 4. Управляющий момент (а) и скорость (б) исполнительного органа (время запаздывания $t = 0,008$ с)

электромеханической системы, могут быть описаны дифференциальными уравнениями II порядка, решение которых осуществляется численными методами. Для обеспечения требуемых параметров движения исполнительного звена медицинского мехатронного подъемника необходимо ввести режимы регулирования электроприводом, которые позволяют обеспечивать воспроизведение планируемой скоростной характеристики с высокой точностью при сравнительно низком уровне ускорений исполнительного органа на всем этапе движения. Данная система обрабатывает планируемую скоростную характеристику при запаздывании управляющих сигналов не более чем на 0,008 с. Для воспроизведения требуемой скоростной характеристики с большей точностью целесообразно применить режим пропорционального регулирования, который, в сочетании с подобранными коэффициентами пропорциональности, позволяет обеспечить требуемую скоростную характеристику с высокой точностью. При этом уровень ускорений исполнительного органа на всем этапе движения достаточно низок (не более 0,5...1g).

Благодаря своей универсальности, медицинский мехатронный электроподъемник подходит для выполнения широкого спектра задач по перемещению пациентов и может быть легко адаптирован к индивидуальным параметрам больного. Использование электрической системы позиционирования позволяет дистанционно управлять положением пациента и снимает нефизиологическую биомеханическую нагрузку с медицинского персонала. Эксплуатировать мехатронный подъемник может один сотрудник патронажной службы. При этом использование подобных вспомогательных медицинских устройств требует точных пространственных решений, а также соблюдения ряда условий и методик безопасного перемещения пациента [10].

Заключение

Проблема здоровья медицинских работников приобретает все большую значимость, оказывая большое влияние не только на качество жизни, но и на качество предоставляемых населению услуг. Применение вспомогательных технических средств призвано минимизировать риски получения травм медперсоналом и обеспечить качественный уход за тяжелобольными. По сути, это единственный способ осуществлять эффективный уход за маломобильными пациентами и одновременно создавать оптимальные эргономические условия для медицинского персонала. Многофункциональные вспомогательные средства для перемещений необходимы практически во всех лечебных учреждениях для облегчения работы медперсонала, а также в жилых помещениях для создания комфортных условий по уходу за людьми с ограниченными возможностями.

Разрабатываемый медицинский мехатронный подъемник может использоваться для поднятия, опускания и перемещения на определенное расстояние как лежачих больных, переворачивание которых по медицинским показаниям противопоказано, так и инвалидов с нарушениями функций ОДА. Наличие на рабочих местах подобного современного оборудования призвано улучшить условия труда медицинского персонала и решить проблему снижения физической нагрузки и травматизма медицинских работников.

Список литературы:

1. *Корневский Н.А., Яцун С.Ф., Яцун А.С. и др.* Экзоскелет с биотехнической обратной связью для вертикализации пациентов // Медицинская техника. 2017. № 45. С. 42-45.
2. *Ачкасов Е.Е., Шурупова Р.В., Куришев В.В.* Социальная реальность профессиональной деятельности врача // Справочник врача общей практики. 2015. № 2. С. 74-79.
3. *Вебер В.Р., Чуваков Г.И., Лапотников В.А. и др.* Основы сестринского дела. – М.: Медицина, 2015. 216 с.
4. *Давлицарова К.Е.* Основы ухода за больными. Первая медицинская помощь. – М.: Медицина, 2016. 286 с.
5. *Макиенко М.А.* Проблемы и перспективы сохранения качества жизни пожилых людей в Российской Федерации // Вестник науки Сибири. 2015. № 1 (16). С. 29-39.
6. *Суворов А.Ю., Иванова Г.Е., Стаховская Л.В. и др.* Основы правильного позиционирования и перемещения пациента с очаговыми поражениями головного мозга. – М.: РКИ Соверо-пресс, 2014. 28 с.
7. *Новокрещенова И.Г., Сенченко И.К.* Качество оказания медицинской помощи пожилым в амбулаторно-поликлинических условиях: по данным социологического исследования // Саратовский научно-медицинский журнал. 2014. № 1. С. 21-26.
8. *Jatsun S.M., Rukavitsyn A.N.* Design of automated device for knee joint mechanotherapy // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. № 3. PP. 178-181.
9. *Корневский Н.А., Попечителев Е.П.* Биотехнические системы медицинского назначения. – Старый Оскол: Изд-во «ТНТ», 2012. 688 с.
10. *Татарова О.М.* Комплексный центр социального обслуживания: опыт предоставления социальных услуг гражданам старшего поколения и инвалидам // Социальное обслуживание. 2016. № 87. С. 52-59.

*Светлана Михайловна Яцун,
д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой,
кафедра медико-биологических дисциплин,
оздоровительной и адаптивной
физической культуры,
ФГБОУ ВО «Курский
государственный университет»,
Андрей Сергеевич Яцун,
канд. техн. наук, заведующий НИЛ,
НИЛ «Мехатроника и робототехника»,
Александр Николаевич Рукавицын,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра механики, мехатроники
и робототехники,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск,
e-mail: alruk75@mail.ru*

* * * * *