

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-90-102>



Адаптивный алгоритм системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором

С.Ф. Яцун¹, А.В. Мальчиков¹✉, М.П. Щербакова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Резюме

Цель. Разработка схемы и адаптивного алгоритма работы интеллектуальной человеко-машинной системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора, учитывающего физиологические особенности оператора, колесной платформы и внешней среды.

Задачи. Изучение физиологических особенностей человеко-машинного взаимодействия у людей с повреждением опорно-двигательного аппарата. Разработка конструкции и математическое описание джойстика как компонента человеко-машинной системы. Разработка адаптивного алгоритма и математического обеспечения системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора.

Методы. Использование метода конечных автоматов для описания алгоритма переключения режимов движения. Применение полиномиальных функций с целью получения гладких законов изменения задающих значений для приводов устройства. Использование нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика для обеспечения адаптивных режимов движения коляски-вертикализатора.

Результаты. В ходе исследования были разработаны и описаны режимы движения инвалидной коляски-вертикализатора. Представлены и описаны схема конструкции и принцип работы джойстика. Математически и графически описаны режимы функционирования человеко-машинной системы. Предлагаемые в работе адаптивные алгоритмы системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора интерпретируют наклоны джойстика в задающие сигналы для регуляторов приводов коляски. Описано использование нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика для обеспечения адаптивных режимов работы коляски, учитывающих особенности движения рук людей с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата, движение коляски и состояния внешней среды.

Заключение. Разработанные в рамках работы адаптивные алгоритмы человеко-машинной системы и режимы движения инвалидной коляски-вертикализатора позволяют повысить безопасность и плавность движения за счет использования нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика и гладких законов задающих воздействий, полученных на основании полиномиальных функций.

Ключевые слова: инвалидная коляска-вертикализатор; джойстик; адаптивные алгоритмы; режимы движения; гладкая функция; конечный автомат.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке программы стратегического развития вузов "Приоритет-2030".

Для цитирования: Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Щербакова М.П. Адаптивный алгоритм системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 90-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-90-102>.

Поступила в редакцию 23.11.2022

Подписана в печать 18.01.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Проблема помощи людям с нарушением опорно-двигательного аппарата остаётся одной из самых сложных, требующих от общества не только её понимания, но и участия в её решении. Согласно государственной информационной системе «Федеральный реестр инвалидов», на октябрь 2022 г., количество инвалидов в России превысило 10 млн., среди которых более 1 млн. человек – это инвалиды I группы, не менее трети которых не могут передвигаться самостоятельно. Для помощи таким людям призваны помочь различные приспособления: пандусы, подъёмники (вертикальные и горизонтальные), ступенькоходы, вертикализаторы, инвалидные кресла. Наиболее универсальным из перечисленных систем помощи инвалидам является коляска-вертикализатор [1-4]. Результаты клинических исследований показывают, что регулярная вертикализация является одной из самых эффективных реабилитационных процедур, которая показана пациентам с болезнями опорно-двигательного аппарата (ОДА) [5-7]. Она способна во многом улучшить обмен веществ и процесс кровообращения, ее методы самым благоприятным образом воздействуют на дыхательную, опорно-двигательную и

нервную систему человеческого организма [7].

Совмещение транспортных функций и функций вертикализатора требует особого внимания к реализации пользовательского интерфейса, с помощью которого оператор устройства может задавать требуемый режим работы. Вместе с тем, у людей с нарушением ОДА более чем в 50% случаев наблюдаются нарушения общей и мелкой моторики рук [8].

В связи с этим возникают сложности в управлении роботизированными устройствами из-за некорректного использования джойстика. Таким образом, необходима интеллектуальная фильтрация воздействий со стороны оператора. В отдельных случаях система не должна реагировать на поступающие воздействия, например, одновременное задание нескольких режимов движения, максимальное задание скорости движения, резкое изменение режима движения и т.д.

В рамках работы рассматривается актуальная проблема исследования и создания человеко-машинного интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора (ИКВ) [9-11], учитывающего особенности людей с ограниченными возможностями.

Целью работы является разработка схемы и принципа работы интеллектуаль-

ной человеко-машинной системы пользовательского интерфейса ИКВ, реализующего адаптивные алгоритмы, учитывающего физиологические особенности оператора, колесной платформы и внешней среды.

Материалы и методы

Важнейшим вопросом при создании устройств коллаборативной робототехники является передача информации между машиной и оператором. К сожалению, быстрота реакции и огра-

ничения восприятия людей с инвалидностью не всегда позволяет избежать столкновений с препятствиями, правильно выбрать траекторию и скорость движения, обеспечить безопасность [12-14]. Рассматриваемые в работе адаптивные алгоритмы системы управления, позволяют обеспечить комфорт и безопасность пользователя и устройства ИКВ.

Схема конструкции и системы автоматического управления рассматриваемого устройства показана на рис. 1.

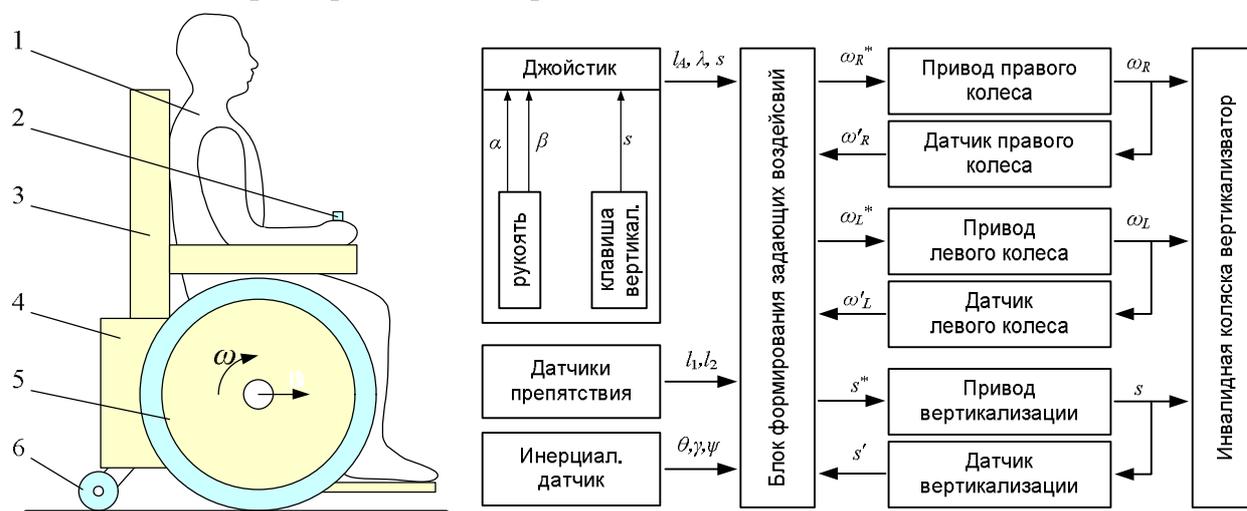


Рис. 1. Схема конструкции и системы управления инвалидной коляски-вертикализатора (ИКВ):
1 – оператор ИКВ; 2 – джойстик ИКВ; 3 – привод вертикализации; 4 – блок управления и аккумуляторы; 5 – ведущее колесо ИКВ; 6 – пассивное колесо

Инвалидная коляска-вертикализатор состоит из колесной платформы, устройства вертикализации и блока управления, оснащенного джойстиком, расположенного на подлокотнике. Для выбора режима работы ИКВ: коляска или вертикализация, используется отдельная клавиша джойстика. Для задания скорости и направления движения в режиме коляски используется непосредственно сам джойстик. Сигналы с ин-

формационной системы джойстика (l_A, λ, s) поступают на блок управления, который формирует сигналы для контуров управления скоростью вращения ведущих колес ИКВ (ω_R^*, ω_L^*). В режимах движения также используются данные с датчиков препятствий (l_1, l_2).

Рассмотрим схему конструкции важнейшего элемента человеко-машинной системы – джойстика (рис. 2).

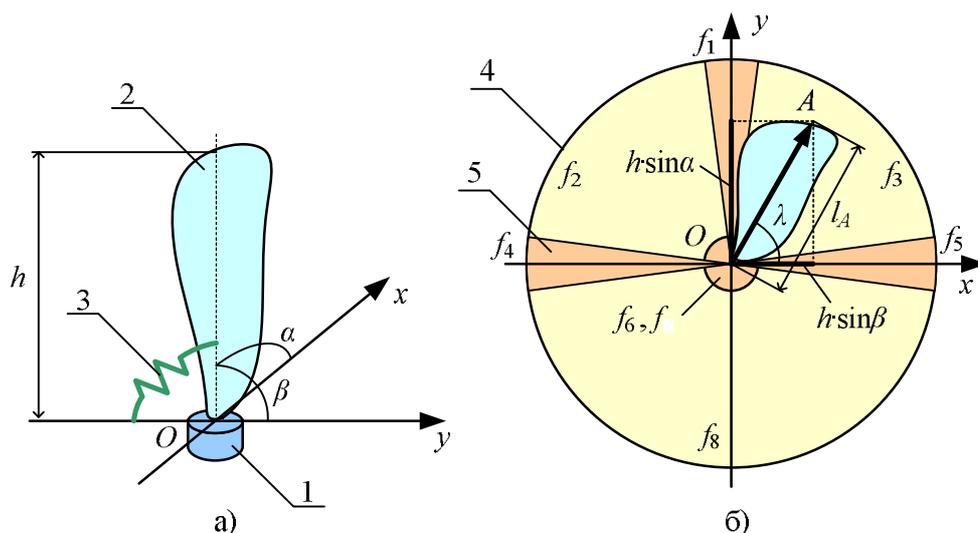


Рис. 2. Схема джойстика ИКВ: **1** – основание джойстика; **2** – рукоять; **3** – возвратная пружина; **4** – проекция рабочей области рукояти на плоскость Oxy ; ось, **5** – зоны нечувствительности

Джойстик представляет собой подпружиненную рукоять, оснащенную двумя датчиками угла поворота α и β (поворот вокруг оси y и x , соответственно) (рис.2,а). В конструкции джойстика присутствуют механические ограничители, не позволяющие отклонять рукоять более 60° от вертикального положения. Указанный функционал джойстика позволяет осуществлять регулирование скорости и направления движения устройства.

Предлагаемые в работе алгоритмы системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором призваны интерпретировать наклоны джойстика в задающие сигналы для регуляторов приводов ИКВ. Адаптивные свойства алгоритма обусловлены учетом различных факторов при формировании сигналов для приводов устройства. Так, например, необходим учет текущей скорости при смене режимов

(недопущение опрокидывания при повороте на скорости), ограничение желаемой скорости в зависимости от условий движений, обеспечение плавности разгона, торможения и поворота, фильтрация импульсных воздействий на рукоятку, вызванные спастичностью, судорогами или тремором у пациента. Для обеспечения адаптации задающей скорости вращения колес к сигналам рукоятки, в работе предлагается использовать нелинейные коэффициенты чувствительности, позволяющие ограничивать максимальные значения задающей скорости, игнорировать незначительные и случайные отклонения рукояти при движении ИКВ.

Результаты и их обсуждение

Для удобства математического описания алгоритмов, сигнал с джойстика представим в виде вектора OA , выхо-

дящего из начала координат и направленного под углом λ (рис. 2, б).

Длина вектора l_A будет определяться следующим образом: $|OA| = \sqrt{(\hat{\alpha}^2 + \hat{\beta}^2)}$, где $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ – показания датчиков углов поворота, а направление определяем согласно: $\lambda = \arctg(\hat{\alpha}/\hat{\beta})$. Далее будем опе-

рировать только значениями l_A и λ , характеризующими перемещение рукояти джойстика.

Алгоритм перехода между отдельными режимами функционирования устройства покажем в виде схемы конечного автомата (рис.3).

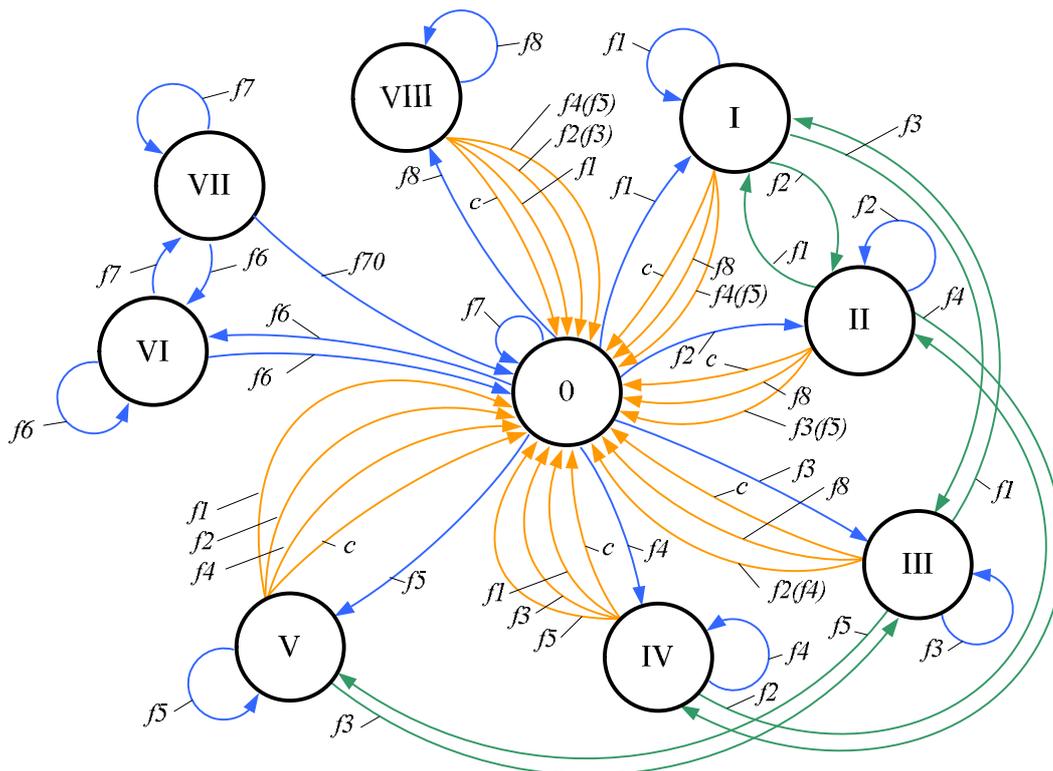


Рис. 3. Конечный автомат переходов между режимами движения

На данной схеме римскими цифрами I-VIII и 0 обозначены режимы, а латинскими буквами, в том числе с индексами, обозначены условия перехода. Как видно из схемы, большинство режимов может переключиться только при полной остановке (режим 0). Однако, возможны и плавные переходы, например между режимами «вперед» и «вперед влево» («вперед вправо»), при

этом пересчет угловых скоростей обеспечивает требуемые динамические характеристики движения ИКВ.

Плавный переход между режимами достигается за счет формирования гладких законов изменения задающих значений для приводов устройства полиномиальными функциями следующим образом: $\bar{\Omega} = (0, \sum_{i=0}^3 k_i t^i)^T$, где ко-

эффиценты k_i определяются следующим образом [15]:

$$\begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_T & t_T^2 & t_T^3 \\ 1 & t_K & t_K^2 & t_K^3 \\ 0 & 1 & 2t_T & 3t_T^2 \\ 0 & 1 & 2t_K & 3t_K^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_K \\ \dot{\omega}_T \\ \dot{\omega}_K \end{bmatrix}.$$

В нашем случае t_T – текущее время (определяется в миллисекундах по системному таймеру с момента включения питания системы управления ИКВ); t_K – конечное время (время, до которого устройство должна набрать/снизить заданную джойстиком скорость); $\omega_T, \dot{\omega}_T$ – текущее значение скорости (определяется с помощью датчиков, установленных на приводах ведущих колес) и ее производной (рассчитывается на контроллере методом конечных разностей); $\omega_K, \dot{\omega}_K$ – задаваемое наклоном джойстика значение желаемой скорости и ее производная (в большинстве случаев $\dot{\omega}_K=0$). Временной отрезок $[t_T, t_K]$ при расчете разгонных (тормозных) траекторий определяется согласно заданным заранее ограничениям максимального ускорения движения коляски (в общем случае определяется возможностями силовой установки ИКВ, однако может быть снижено по рекомендациям врачей). В пересчете на ускорение вращения вала привода это значение ϵ_{max} . Конечное время для построения полинома зависит от предельных значений ускорения (перегрузок) и текущих измеряемых и рассчитываемых параметров скорости и может быть записано следующим образом:

$$t_K = t_T + \frac{(\omega_K - \omega_T)}{\epsilon_{max}}.$$

Обратим внимание, что значение максимального ускорения для разных режимов может быть разным.

Таким образом, требуемый закон изменения задающей скорости может быть представлен функцией исходных и рассчитываемых и измеряемых параметров в следующем виде:

$$\omega^* = \Omega(t_T, t_K, \omega_T, \omega_K, \dot{\omega}_T, \dot{\omega}_K, t). \quad (1)$$

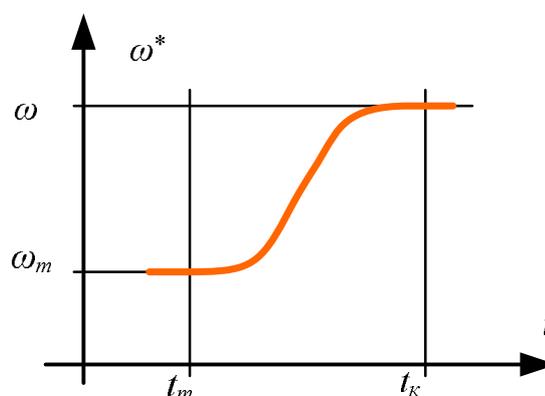


Рис. 4. Схема построения закона задающих воздействий с помощью полиномиальной функции

Таким образом требуемое значение скорости адаптируется в зависимости от состояния и текущего режима ИКВ.

В рамках рассматриваемой работы, согласно схеме на рис. 3, предлагается набор из 8 режимов движения робота в зависимости от положения рукоятки джойстика. Рассмотрим подробно режимы работы устройства и условия переходов.

I (VIII). «Вперед» («назад»). Базовым режимом движения для ИКВ является прямолинейное движение «вперед». Условием запуска режима «вперед» является наклон рукоятки в поло-

жительном направлении вокруг оси y , $f1$: ($85^\circ < \lambda < 95^\circ$).

Движение «назад» инициируется наклоном рукоятки в отрицательном направлении вокруг оси y $f10$: ($-95^\circ < \lambda < -85^\circ$).

При задании движения «вперед» («назад») система управления формирует гладкий закон изменения скорости до значения, соответствующего положению рукоятки, следующим образом:

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_\alpha l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), t \in [t_T, t_k], \quad (2)$$

где k_α – коэффициент чувствительности рукоятки джойстика вокруг оси x .

При активации режима движения «назад» система формирует сигнал для системы управления приводами аналогичным способом. Отметим, что коэффициент чувствительности рукоятки k_α является функцией угла наклона рукоятки следующим образом: $k_\alpha(\alpha) = k'_\alpha$ – для движения вперед, $k_\alpha(\alpha) = k''_\alpha$ – для движения назад.

С помощью нелинейного коэффициента чувствительности датчика система ограничивает максимально допустимую скорость движения назад, оставляя возможность точно настроить скорость с помощью рукоятки. Введение коэффициента чувствительности рукоятки джойстика открывает широкие возможности при реализации человеко-машинного взаимодействия. Так, например, коэффициент k_α может зависеть от текущей скорости коляски, снижая чувствительность на большой скорости или повышая чувствительность при медленном движении (преодоление

препятствий, приближение к объектам вплотную и т.д.).

В простейшем случае значения коэффициентов могут быть определены исходя из максимальной скорости коляски следующим образом: $k'_\alpha = \omega_{\max.f} / l_{A.\max}$, $k''_\alpha = \omega_{\max.b} / l_{A.\max}$, где $\omega_{\max.f}$ и $\omega_{\max.b}$ – максимально допустимые скорости движения вперед и назад соответственно, $l_{A.\max}$ – максимальное значение вектора сигнала джойстика.

Важной особенностью данных режимов «вперед» и «назад» является то, что при формировании задающих сигналов для регуляторов приводов учитываются данные, поступающие с ультразвуковых дальномеров, расположенных на ИКВ, а также с инерциального датчика, определяющего угол наклона ИКВ относительно поверхности. Так при наличии препятствия на пути движения происходит звуковое оповещение и независимо от задаваемой пользователем скорости (значения l_A), рассчитывается закон торможения в следующем виде:

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, 0,028, \dot{\omega}_T, 0, t). \quad (3)$$

При проектировании чувствительность датчика настраивается таким образом, чтобы расстояния от коляски до препятствия хватило для торможения с заданным ускорением. Обратим внимание, что скорость сбрасывается до 0,028 рад/с (соответствует скорости движения коляски 0,03 км/ч). Полной остановки не происходит для возможности максимально близко подъехать к желаемому

объекту (тренажеру, кровати, и т.д.). В режиме прямолинейного движения «вперед» и «назад» скорости вращения левого и правого колеса равны.

Отметим, что согласно предлагаемому алгоритму, запуск приводов вертикализации невозможен и может быть запущен только при полной остановке ИКВ (фиксируется показаниями текущих частот вращения колес) и активации соответствующего режима на пульте управления устройства.

IV, (V). «Разворот влево» («Разворот вправо»). Данный режим позволяет коляски осуществить разворот на месте вокруг геометрического центра, расположенного в центре оси ведущих колес. Режим запускается наклоном рукоятки вдоль поперечной оси y , $f4$: $-5^\circ < \lambda < 5^\circ$ – разворот направо, $f5$: $175^\circ < \lambda < 185^\circ$ – разворот налево. Здесь $\pm 5^\circ$ – коридор нечувствительности, введенный для удобства пользователя. Так как разворот предполагает вращение колес с одинаковой угловой скоростью, но в разных направлениях то режим может запускаться только при полной остановке робота. При движении такая команда будет означать желание пользователя остановить ИКВ.

Таким образом желаемые конечные скорости колес, в зависимости от величины наклона рукоятки (l_A) рукоятки джойстика будет:

– для разворота направо: $\omega_{к.L} = k_\beta l_A$,
 $\omega_{к.R} = -k_\beta l_A$,

– для разворота налево: $\omega_{к.L} = -k_\beta l_A$,
 $\omega_{к.R} = k_\beta l_A$.

При этом, согласно указанной методике, система управления ИКВ формирует гладкие законы изменения вращения приводов.

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, \pm k_\beta l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \quad (4)$$

где k_β – коэффициент чувствительности рукоятки джойстика вокруг оси y .

Значение коэффициента k_β может быть определено исходя из максимальной скорости коляски при развороте следующим образом: $k_\beta = \omega_{\max.r} / l_{A.\max}$, где $\omega_{\max.r}$ – максимально допустимые скорость при развороте.

II, (III). «Вперед влево» («Вперед вправо»). Данный режим позволяет менять направление движения без остановки. Таким образом, желаемая траектория движения будет представлять собой фрагмент дуги с определенным радиусом, зависящим от положения рукоятки. Данные режимы инициируются наклоном рукоятки одновременно вперед и в сторону: $f3$: $5^\circ \leq \lambda \leq 85^\circ$, – вперед вправо, $f4$: $95^\circ \leq \lambda \leq 175^\circ$ – вперед влево.

Как можно понять, данный режим с точки зрения наклона рукоятки является переходным между вперед и разворот на месте, поэтому рассмотрим расчет конечных желаемых значений угловых скоростей колес согласно схеме (рис. 5).

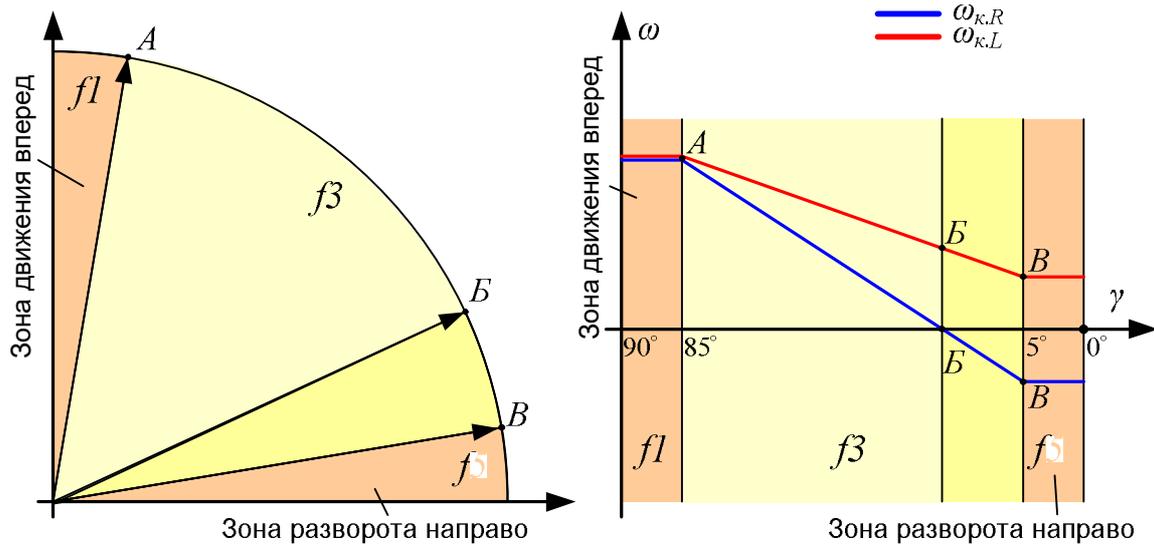


Рис. 5. Схема смены режимов в зависимости от положения рукоятки

Согласно схеме, показанной на рис. 5, отражающей наклон рукоятки вправо-вперед, в диапазоне от $\lambda=0^\circ..90^\circ$, здесь можно увидеть 4 отдельные зоны: зона движения вперед (условие $f1$), зона разворота направо (условие $f5$), зона движение вперед направо (условие $f3$), а также переходная зона. Особенность переходной зоны заключается в том, что скорости вращения колес ИКВ имеют разный знак, но при этом не равны между собой, что позволяет двигаться с радиусом кривизны меньшим, чем расстояние между колесами. Такое разнообразие режимов поворота-разворота дает коляске высокие маневровые характеристики, что необходимо при перемещении в ограниченном пространстве больничной палаты или жилой комнаты.

Рассмотрим формирование значения желаемых угловых скоростей колес при правом повороте: $\omega_{к.Л} = k_E l_A$, $\omega_{к.Р} =$

$k_I l_A$, здесь k_E , k_I – коэффициенты для внешнего и внутреннего колес соответственно, значения которых рассчитываются по крайним положениям в зависимости от угла λ следующим образом:

- для точки А: $k_E = k_I = k_A = \omega_{\max.f} / l_{A.\max}$,
- для точки Б: $k_I = 0$,
- для точки В: $k_E = \omega_{\max.r} / l_{A.\max}$, $k_I = -\omega_{\max.r} / l_{A.\max}$.

Таким образом система управления ИКВ формирует гладкие законы изменения угловой скорости вращения колес для вперед-направо:

$$\begin{cases} \omega_L^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_E l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \\ \omega_R^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_I l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \end{cases} \quad (5)$$

– для вперед налево:

$$\begin{cases} \omega_L^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_I l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \\ \omega_R^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_E l_A, \dot{\omega}_T, 0, t). \end{cases} \quad (6)$$

Линейные законы изменения коэффициентов угловых скоростей для внутреннего и внешнего колеса обеспечивают

ограничение скорости при повороте, препятствующего опрокидыванию коляски.

Отметим, что система управления ИКВ из-за соображения безопасности не подразумевает режима назад-вправо или назад-влево. Наклон рукоятки в соответствующие области при движении вперед будет приводить к остановке устройства. Наклон рукоятки на углы $\lambda = -5^\circ \dots -85^\circ$, $\lambda = 185^\circ \dots 265^\circ$, при нулевой скорости, будет приводить к движению назад, согласно режиму, описанному ранее.

VI, (VII). «Вертикализация» («Посадка»). Режим вертикализации пациента инициируется с отдельной клавишей на пульте управления (условие $f6$ ($f7$)). Режим может быть запущен только при полной остановке робота, любые движения джойстика при этом системой управления игнорируются. Движение в вертикальной плоскости описывается гладкими функциями для подъема:

$$v^* = \Omega(t_T, t_K, 0, v_{max}, 0, 0, t), \quad (7)$$

для посадки:

$$v^* = \Omega(t_T, t_K, v_{max}, 0, 0, 0, t), \quad (8)$$

где v_{max} – предельная скорость перемещения вертикализатора 0,012 м/с. Отметим, что в процессе подъема движение может быть прервано и запущен режим посадки. Возврат к режиму коляски может быть осуществлен только при нижнем положении кресла ИКВ.

Выводы

Обеспечение безопасности передвижения людей с ограниченными возможностями требует учета физиологических особенностей человеко-машинно-го взаимодействия при реализации пользовательских интерфейсов роботизированных ассистирующих устройств. В рамках работы предложена схема адаптивного алгоритма переключения режимов работы инвалидной коляски-вертикализатора, учитывающая возможные ошибки задания параметров движения, связанные с нарушением работы ОДА пациента: судороги, тремор, спастичность. Кроме того, нелинейные коэффициенты чувствительности рукоятки джойстика ИКВ позволяют обеспечивать бесшовную смену режимов, а использование полиномиальных функций в системе формирования задающих воздействий для регуляторов двигателей обеспечивает плавность переходных процессов и адаптацию к текущему состоянию ИКВ. Предлагаемый математический аппарат, описывающий функционирование адаптивного алгоритма, может быть реализован в виде программного обеспечения системы управления инвалидных кресел и прочих устройств, требующих создания человеко-машинного интерфейса между роботизированной системой и человеком с нарушением функций ОДА.

Список литературы

1. Крапивина Ю. Д., Киба Д. А. Система управления вертикализатором для инвалидных колясок // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Комсомальск-на -Амуре, 2017. С. 114-116.
2. Щербакова М. П., Мальчиков А. В. Разработка многоканальной САУ инвалидной коляски-вертикализатора // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике. Курск, 2021. С. 300-303.
3. Simpson R. C. Smart wheelchairs: A literature review // Journal of rehabilitation research and development. 2005. Т. 42. №. 4. С. 423.
4. Lankenau A., Rofer T. Smart Wheelchairs - State of the Art in an Emerging Market // KI. 2000. Vol. 14. №. 4. P. 37-39.
5. Вертикализация: обоснование ключевой роли в общей системе реабилитации / С. Г. Щербак, А. Е. Терешин, А. С. Голота, А. Б. Крассий // Медицинский алфавит. 2010. Т. 1. №. 4. С. 32-34.
6. Макарова М. Р., Ромашин О. В. Вертикализация как фактор ранней реабилитации больных с травматической болезнью спинного мозга // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2013. Т. 90. №. 4. С. 47-52.
7. Вадутов Р. Р., Быков Е. В., Коломиец О. И. Эффективность ранней вертикализации после оперативного лечения поясничного отдела позвоночника // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2018. Т. 13. №. 2. С. 232-238.
8. Barondess, J. A., Cullen, M., De Lateur, B. Musculoskeletal disorders and the workplace. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2001.
9. Разработка вертикальной направляющей для процесса вертикализации ИКВ / А.В. Мальчиков, М.П. Щербакова, Л.В. Березина, А.С. Печурин, А.Ю. Белов // Молодежь и XXI век - 2020. Т. 4. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 171-174.
10. Щербакова М.П., Рукавицын А.Н. Гусева Ю.В., Развитие биомехатронных технологий для людей с ограниченными физическими возможностями. Школа юных инноваторов. Курск, 2018. 435 с.
11. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system / S. Jatsun, A. Malchikov, O. Loktionova, A. Yatsun // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2020. P. 116-125.
12. Hartman A., Nandikolla V. K. Human-machine interface for a smart wheelchair // Journal of Robotics. 2019.

13. Incorporating user inputs in motion planning for a smart wheelchair / S. P. Parikh, V. Grassi, V. Kumar, J. Okamoto // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004. IEEE, 2004. Vol.2. P. 2043-2048.

14. Marchal-Crespo L., Furumasu J., Reinkensmeyer D. J. A robotic wheelchair trainer: design overview and a feasibility study // Journal of neuroengineering and rehabilitation. 2010. Vol. 7. №. 1. P. 1-12.

15. Simulation of a walking robot-exoskeleton movement on a movable base / S. Jatsun, A. Malchikov, A. Yatsun, A. S. M. Leon // Journal of Artificial Intelligence and Technology. 2021. Vol. 1. №. 4. P. 207-213.

16. Бартенев В.В., Яцун С.Ф. Анализ методов управления движением мобильных колесных роботов по заданной траектории // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных трудов международной конференции. Курск, 2012. С. 144-152.

17. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук. М.: Наука, 2001. С. 26-91.

18. Tzafestas S. G. Mobile robot control and navigation: A global overview // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. Vol. 91. № 1. P. 35-58.

19. Бартенев В. В., Яцун С. Ф., Аль-Еззи А. С. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. №. 4-1. С. 288-293.

Информация об авторах

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknnp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Щербакова Мария Петровна, инженер научно-исследовательской лаборатории кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 5-storm-7@mail.ru