



Об авторах

Сергей Валерьевич Веревкин — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: verevkinserg@mail.ru

Денис Ярославович Околот — преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: dokolot@kantiana.ru

Сергей Александрович Дёмин — ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: sergeidemin@nm.ru

33

About the authors

Dr Sergey Vervovkin, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: verevkinserg@mail.ru

Denis Okolot, instructor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: dokolot@kantiana.ru

Sergey Demin, high instructor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: sergeidemin@nm.ru

УДК 531.3

А. В. Борисов

ЭМПИРИЧЕСКИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ ЭКСОСКЕЛЕТА

Представлены два возможных подхода к управлению движением экзоскелета. Первый – заключается в эмпирическом определении управляющих воздействий на человеке, их усилении и реализации в приводах, расположенных в шарнирах-суставах экзоскелета. Суть второго – в синтезе аналитических функций, обеспечивающих антропоморфные периодические движения экзоскелета. Новизна работы заключается в учете изменения длин звеньев экзоскелета. В качестве численного примера проводится исследование поведения модели с пятью подвижными звеньями. Представлены фазовые портреты основных характеристик движения. Полученные результаты показывают значительные различия между поведением модели при рассмотренных подходах к управлению движением экзоскелета.

The article presents two possible approaches to controlling the movement of the exoskeleton. The first approach is the empirical determination of control actions on a person, their amplification and realization in the drives located in the hinges-joints of the exoskeleton. The essence of the second approach is the synthesis of analytical functions that provide anthropomorphic periodic movements of the exoskeleton. The novelty of the work is to take into account

the change in the lengths of the links of the exoskeleton. As a numerical example, the behavior of a model with five moving links is studied. The phase images of the main motion characteristics are presented. The obtained results show significant differences between the behavior of the model in the considered approaches to controlling the movement of the exoskeleton.

Ключевые слова: управление, экзоскелет, шарнир-сустав, звенья переменной длины, дифференциальные уравнения движения, фазовые портреты.

Key words: control, exoskeleton, joint-joint, links of variable length, differential equations of motion, phase portraits.

Введение

Исследованию и разработке моделей экзоскелетов и антропоморфных роботов посвящено большое количество работ [1–11]. Но практически все предлагаемые модели конструируются с использованием абсолютно твердых звеньев. Соответственно, энергозатраты таких механизмов выше, а походки, полностью имитирующей движения человека, достичь не удастся. Предлагаемая в данной работе модель восполняет указанный недостаток. В ней учитываются деформации сжатия-растяжения стержней, имитирующих нижние конечности, как наиболее значимые при реальной антропоморфной ходьбе. Деформациями изгиба и кручения стержней пренебрегаем ввиду их незначительности.

1. Описание модели экзоскелета

На рисунке 1 показана модель экзоскелета с пятью подвижными звеньями переменной длины.

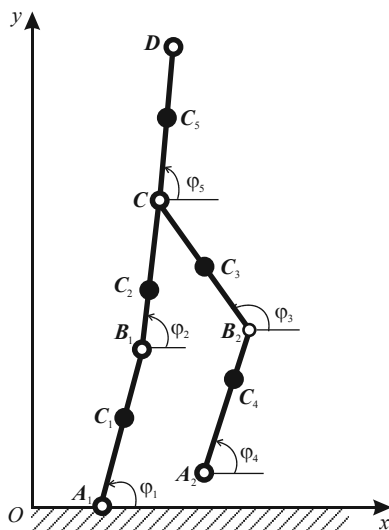


Рис. 1. Модель экзоскелета с пятью подвижными звеньями переменной длины



Каждое подвижного звено имеет переменную длину $l_i(t)$ ($i = 1, \dots, 5$). Управление сосредоточено в точке шарнирного крепления. Звено состоит из одного невесомого стержня переменной длины и трех точечных масс, две из которых размещены на концах стержня в шарнирах-суставах, третья масса расположена на стержне между шарнирами-суставами (рис. 1). Массами в шарнирах-суставах, кроме самих подвижных соединений, может моделироваться сустав или электродвигатель, установленный на оси шарнира, имеющий значительную массу и создающий управляющий момент.

Положение каждого звена однозначно определяется углом $\varphi_i(t)$ между горизонталью и звеном, отсчитываемым от горизонтали против хода часовой стрелки, и длиной стержня $l_i(t)$ ($i = 1, \dots, 5$). Система имеет десять степеней свободы. Пусть M_i – момент, развиваемый в i -м шарнире ($i = 1, \dots, 5$). Продольную силу, приложенную на конце стержня и действующую вдоль стержня, обозначим F_i ($i = 1, \dots, 5$). Введем двухиндексные обозначения: 1-й индекс – номер звена, 2-й – номер точечной массы на этом звене. Положение массы в точке, не совпадающей с концами стержня, будем задавать с помощью постоянного множителя n_{i1} ($0 < n_{i1} < 1$). Тогда длина $n_{i1}l_i(t)$ – функция времени, т. е. точечная масса, находящаяся на стержне между его концами, совершает сложное движение: вращательное вокруг нижней точки и поступательное вдоль звена. Такое же движение совершает и точечная масса, расположенная в верхней точке стержня. Таким образом, учитывается изменение положения массы во время движения звена при изменении его длины.

Так как теоретическая модель невесомого стержня переменной длины с сосредоточенными массами на нем при практическом создании экзоскелета может быть реализована, например, в виде телескопического стержня, то продольные силы $F_i(t)$ могут быть реализованы в виде двигателей, совершающих поступательное движение одной части звена относительно другой. Управляющие моменты $M_i(t)$ можно реализовать в виде двигателей, совершающих вращательное движение звена.

Система дифференциальных уравнений движения получена нами в ходе работы над созданием математической модели экзоскелета со звеньями переменной длины и имеет вид

$$A(q, l)\ddot{q} + B(q, l)\dot{q}^2 + gC(q)l + 2D(q, l)(\dot{l}\dot{q}) + E(q, l)\ddot{l} = M(q, l), \quad (1)$$

$$G(q, l)\ddot{q} + H(q, l)\dot{q}^2 + gK(q) + 2L(q, l)(\dot{l}\dot{q}) + P(q, l)\ddot{l} = F(q, l), \quad (2)$$

где q – угловые обобщенные координаты $q = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$; l – обобщенные координаты, описывающие изменения длины звеньев $l = (l_1, \dots, l_n)^T$; $A(q, l)$, $B(q, l)$, $G(q, l)$, $H(q, l)$ – матрицы, учитывающие инерционные свойства; $C(q)$, $K(q)$ – матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $D(q, l)$, $E(q, l)$, $L(q, l)$, $P(q, l)$ – матрицы, учитывающие переменную длину звеньев; $M(q, l)$, $F(q, l)$ – матрицы-столбцы обобщенных сил; \ddot{q} –



матрица обобщенных ускорений; \dot{q} – матрица обобщенных скоростей, тогда $\dot{q}^2 = (\dot{\varphi}_1^2, \dots, \dot{\varphi}_n^2)^T$; $(\dot{l}\dot{q}) = (\dot{l}_1\dot{q}_1, \dots, \dot{l}_n\dot{q}_n)^T$ – матрица, составленная из произведений $\dot{l}\dot{q}$ при равных индексах.

Матричная форма записи уравнений движения (1)–(2) является универсальной и может быть применена к описанию движения экзоскелета с любым количеством звеньев. Структура матриц при этом останется такой же, только изменится, например, их размерность и количество масс, длин звеньев в каждом элементе матрицы.

2. Управление экзоскелетом с помощью эмпирически определенных кинематических характеристик движения

В настоящее время наиболее перспективным и целесообразным видом управления движением экзоскелета представляется считывание нервных сигналов человека, их усиление и реализация приводами экзоскелета. На этой основе решим обратную задачу динамики эмпирическим путем.

Значения параметров для численных расчетов: массы звеньев $m_1 = m_4 = 2,91$ кг, $m_2 = m_3 = 8,93$ кг, $m_5 = 28,93$ кг, они распределялись в виде точечных масс, в шарнирах $\frac{1}{4}$ и на стержне $\frac{1}{2}$ от массы звена.

Множители, задающие положение сосредоточенной массы на стержне равны: $n_{11} = n_{41} = 0,595$, $n_{21} = n_{31} = 0,545$, $n_{51} = 0,500$.

Длины звеньев задавались в виде интерполяционных функций времени по эмпирическим данным.

В проведенных нами исследованиях [3] экспериментально определены углы поворота и изменения длины звеньев, возникающие в опорно-двигательном аппарате человека при ходьбе. Построим фазовые портреты угловых координат от их производных (рис. 2). На рисунках не приводятся фазовые портреты для корпуса, звена 5, так как все время он движется вертикально и угловые скорости и ускорения равны нулю.

Проведем анализ фазовых портретов угла поворота от угловой скорости звеньев (рис. 2). Для первого звена, голени опорной ноги, движение начинается из правой верхней точки $\varphi_1(0) = 1,68$ рад, $\dot{\varphi}_1(0) = -1,57$ рад/с в тот момент, когда нога стала опорной, а переносимая нога оторвалась от земли. Движение по фазовой траектории происходит справа налево, так как угол отсчитывается от горизонтали против хода часовой стрелки (см. рис. 1), и для опорной ноги он уменьшается во все время фазы опоры на эту ногу от максимального значения $\varphi_1 > \pi/2$ в момент постановки ноги на опору до минимального значения $\varphi_1 < \pi/2$ в момент отрыва ноги от поверхности опоры. В первой четверти фазы движения до момента, когда угол $\varphi_1 = \pi/2$, происходит движение по инерции, скорость убывает. Затем после про-



хождения вертикального положения в конце второй четверти фазы происходит резкий скачок угловой скорости. После этого начинается третья фаза, в которой происходит разгон звена, угловая скорость увеличивается, достигая максимального по абсолютной величине значения. Затем звено движется по инерции, угловая скорость уменьшается и в последней четверти фазы опоры на ногу происходит подготовка к отталкиванию от опоры и толчок.

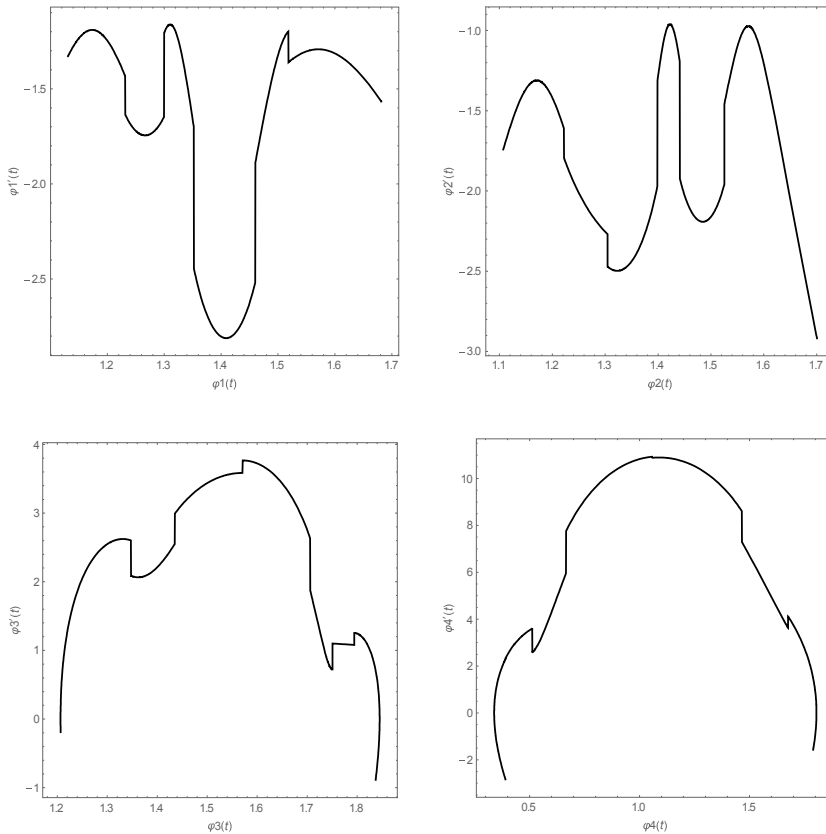


Рис. 2. Фазовый портрет угла поворота от угловой скорости

Похожая качественно зависимость наблюдается для звена под номером два — голени опорной ноги.

Качественно похожими являются фазовые траектории для звеньев с номерами три и четыре — бедра и голени переносимой ноги соответственно. Опишем подробнее фазовый портрет для бедра переносимой ноги. Движение начинается из левой нижней точки $\varphi_3(0) = 1,21$ рад, $\dot{\varphi}_3(0) = -0,19$ рад/с. В отличие от опорной ноги движение происходит с увеличением угла наклона звена, поэтому оно идет в противоположном направлении опорной ноги, слева направо. В глобальном смысле происходит сначала разгон звена после отталкивания от опоры, затем торможение перед постановкой ноги на опору. Однако присутствуют два

симметричных скачка на фазовой траектории во время отталкивания и торможения, соответствующие переходу к баллистическому движению и его окончанию. Максимальное значение угловой скорости достигается при практически вертикальном положении звена.

Построим фазовые портреты для длин звеньев (рис. 3).

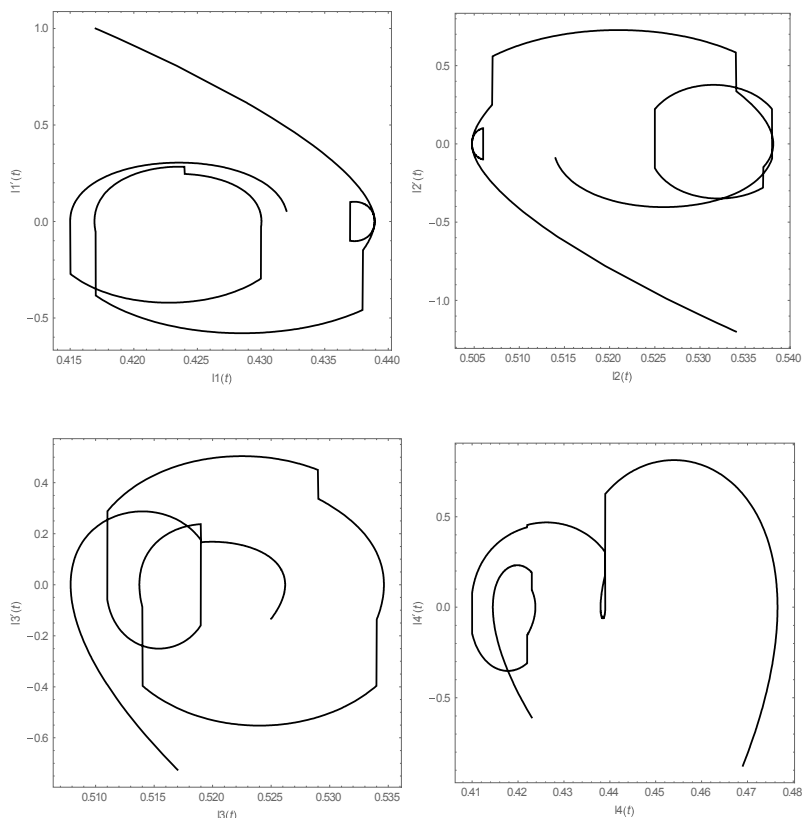


Рис. 3. Фазовый портрет изменения длины звена от ее скорости

Для первого звена, голени опорной ноги, движение по фазовой траектории начинается из левой верхней точки $l_1(0) = 0,42$ м, $\dot{l}_1(0) = 1,00$ м/с и происходит по ходу часовой стрелки. В первой четверти фазы опоры на ногу скорость изменения длины звена убывает. Во второй четверти фазы опоры на ногу примерно в момент, когда опорная нога становится вертикальной, возникает петля и после нее вертикальный участок, связанный с переходом к баллистическому движению и снятию нагрузки со звена и его максимальному удлинению. Затем в третьей четверти нагрузка на звено начинает возрастать, идет подготовка к отталкиванию, в глобальном плане звено сжимается, скорость изменения длины звена увеличивается, но зависимость при этом носит сложный петлеобразный характер. В четвертой четверти во время отталкивания достигается максимальное уменьшение длины звена и в это



время скорость растет практически вертикально, затем достигает максимального значения и потом наступает разгрузка звена, скорость убывает, длина звена увеличивается перед отрывом ноги от опоры.

Примерно такая же, только симметричная картина наблюдается для второго звена. Движение происходит по ходу часовой стрелки. Имеют место такие же петли, участок баллистического движения, подготовка к отталкиванию, отталкивание от опоры и разгрузка звена.

Для третьего звена, бедра переносимой ноги, движение начинается из левой нижней точки $l_3(0) = 0,52$ м, $\dot{l}_3(0) = -0,73$ м/с. В первой четверти фазы переноса продолжается по инерции сжатие звена, но скорость при этом убывает. Такой же участок, только более короткий, присутствует и на фазовой траектории четвертого звена – голени опорной ноги. Далее во второй четверти идет фаза переноса звена и во время, когда звено проходит вертикальное положение, возникает петля. В третьей четверти фазы переноса, после того как пройдено вертикальное положение, звено начинает растягиваться, скорость сначала возрастает, затем начинается торможение, при котором скорость уменьшается, но звено удлиняется. В четвертой четверти происходит удар при постановке ноги на опорную поверхность, длина звена уменьшается при максимальной по абсолютной величине скорости изменения длины звена, после чего скорость быстро растет, изменяет знак и начинается подготовка к фазе отталкивания.

Аналогичное поведение и у звена четыре – голени переносимой ноги. Но кроме петли после отрыва ноги от опоры возникает еще один минимум и петля в момент прохождения вертикального положения, видимо, за счет рывка от вышерасположенного звена, бедра переносимой ноги, у которого в этот момент скорость изменения длины, удлинения, достигает максимального значения, и инерции голени. После этого в третьей четверти фазы переноса ноги скорость изменения длины звена достигает максимального значения, длина звена увеличивается. В последней четвертой четверти удлинение звена достигает максимального значения, после чего происходит его торможение перед постановкой ноги на опору при практически максимальной длине.

На основе полученной эмпирической информации о движениях человека решим обратную задачу динамики: по известным кинематическим характеристикам определим усилия в шарнирах-суставах между подвижными элементами стержневой биомеханической системы. Для этого решаем линейную относительно управляющих моментов систему дифференциальных уравнений движения (1)–(2). Управляющие моменты и продольные силы имеют вид, показанный на рисунках 4 и 5.

По приведенным зависимостям видно, что управление реальной ходьбой человека имеет ярко выраженный импульсный характер. Наблюдается качественное совпадение управляющих моментов для обоих звеньев опорной ноги. Для переносимой ноги подобие выражено не так сильно.

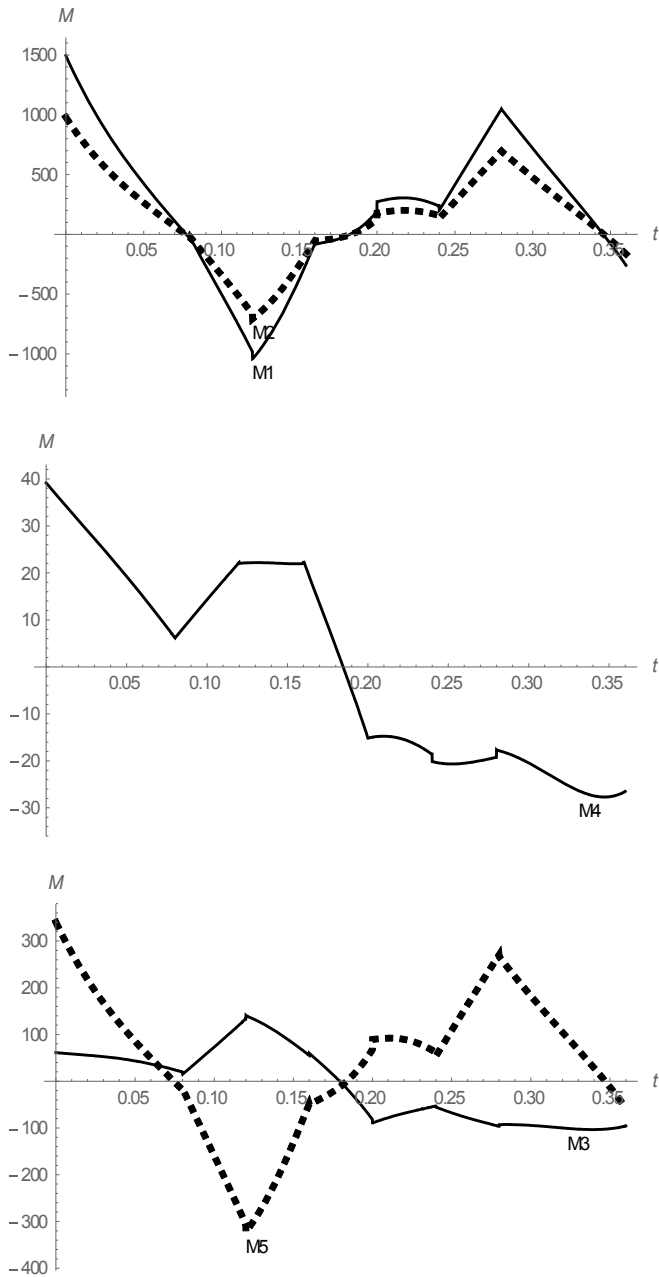


Рис. 4. Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

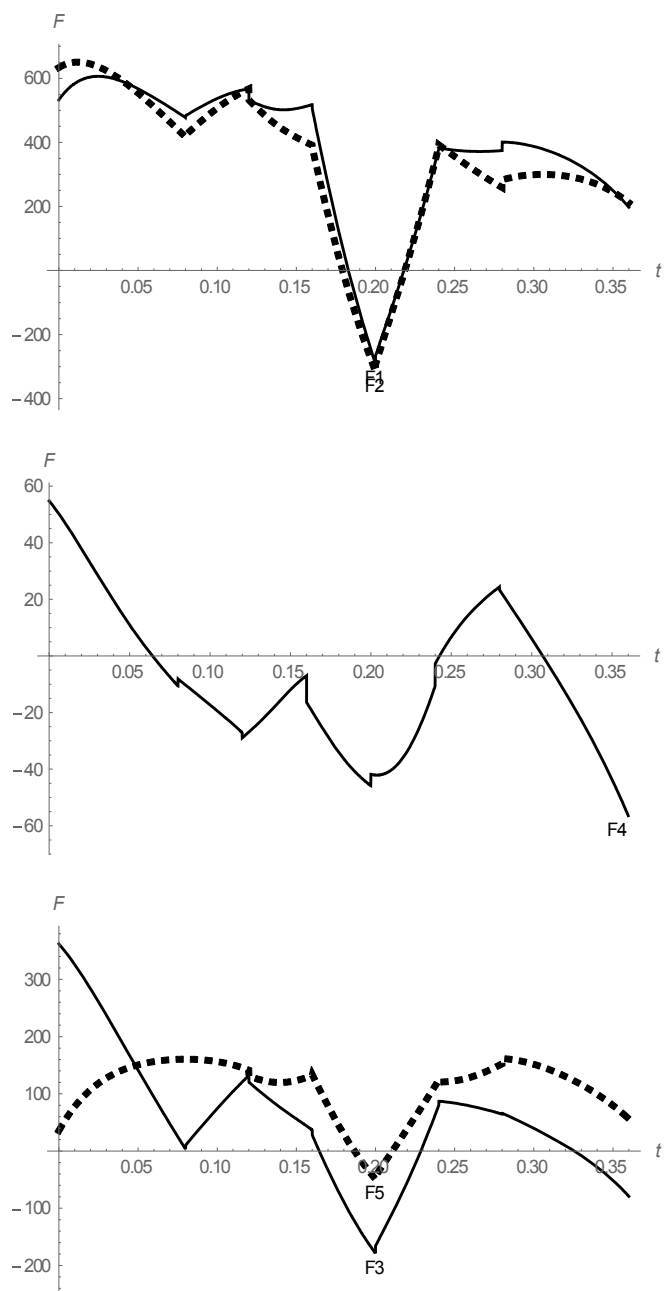


Рис. 5. Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета, от времени

Таким образом, эмпирически решена обратная задача динамики для экзоскелета со звеньями переменной длины.



3. Управление экзоскелетом с помощью аналитически задаваемых кинематических характеристик движения

В некоторых случаях, например для людей с проблемами опорно-двигательного аппарата, для тренировки мышц при восстановлении двигательных функций человека или в спорте для тренировок с помощью экзоскелета и его частей, необходимо, чтобы управление осуществлялось с помощью заданного алгоритма [5; 8]. Рассмотрим алгоритм управления на основе периодических функций, обеспечивающих антропоморфность походки экзоскелета [2]. Зададим функции изменения углов и длин звеньев механизма следующим образом:

$$\varphi_1(t) = \frac{\pi}{2} + j_1 \sin \left[f_1 - \frac{\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \right],$$

$$\varphi_2(t) = \frac{\pi}{2} + j_2 \cos \left[f_2 - \frac{\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \right],$$

$$\varphi_3(t) = \frac{\pi}{2} + j_3 \sin \left[f_3 - \frac{\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \right],$$

$$\varphi_4(t) = \frac{\pi}{2} + j_4 \sin \left[f_4 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \right],$$

$$\varphi_5(t) = \frac{\pi}{2}, \quad l_1(t) = l_1^* + l_1^* \cdot l \cdot \sin \frac{2\pi t}{T},$$

$$l_2(t) = l_2^* + l_2^* \cdot l \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}, \quad l_3(t) = l_3^* - l_3^* \cdot l \cdot \sin \frac{2\pi t}{T},$$

$$l_4(t) = l_4^* - l_4^* \cdot l \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}, \quad l_5(t) = l_5^* + l_5^* \cdot l \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

где T — период ходьбы; j_i и f_i ($i = 1, \dots, 4$) — параметры ходьбы; l_i^* — начальная длина недеформированного звена; l — коэффициент изменения длины звена.

Построим фазовые портреты угловых координат и их производных (рис. 6).

Проведем анализ фазовых портретов угла поворота от угловой скорости звеньев (рис. 6). Для первого звена, голени опорной ноги, движение начинается из правой верхней точки $\varphi_1(0) = 1,82$ рад, $\dot{\varphi}_1(0) = 0$ рад/с в тот момент, когда нога стала опорной, а переносимая нога оторвалась от земли. Движение по фазовой траектории происходит справа налево, так как угол отсчитывается от горизонтали против хода часовой стрелки (см. рис. 1), и для опорной ноги он уменьшается во все время фазы опоры на эту ногу от максимального значения $\varphi_1 > \pi/2$ в момент постановки ноги на опору до минимального значения $\varphi_1 < \pi/2$



в момент отрыва ноги от поверхности опоры. Здесь наблюдается две фазы движения. В первой фазе движения до момента, когда угол $\varphi_1 = \pi/2$, скорость по абсолютной величине возрастает. Затем после прохождения вертикального положения во второй фазе происходит уменьшение угловой скорости до нуля.

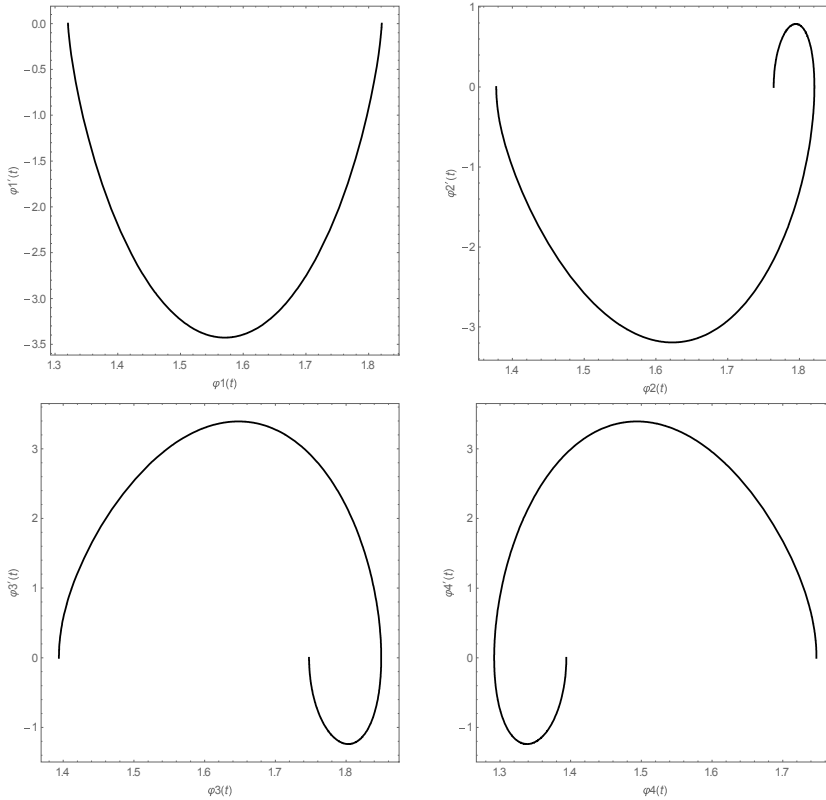


Рис. 6. Фазовый портрет угла поворота от угловой скорости

Похожая качественно зависимость наблюдается для звена под номером два — голени опорной ноги. Движение по фазовой траектории происходит справа налево. Различие заключается в наличии в начале движения петлеобразного участка, на котором угловая скорость изменяет знак на противоположный.

Качественно похожими являются фазовые траектории для звеньев с номерами три и четыре — бедра и голени переносимой ноги соответственно. Опишем подробнее фазовый портрет для бедра переносимой ноги. Движение начинается из левой нижней точки $\varphi_3(0) = 1,39$ рад, $\dot{\varphi}_3(0) = 0$ рад/с. В отличие от опорной ноги движение происходит с увеличением угла наклона звена, поэтому оно идет в противоположном направлении опорной ноги, слева направо. В глобальном смысле происходит сначала разгон звена после отталкивания от опоры, затем торможение перед постановкой ноги на опору. Однако присутствует на фазовой траектории во время торможения перед постановкой ноги на



опору смена знака у угловой скорости. Максимальное значение угловой скорости достигается после прохождения вертикального положения звеном.

Для четвертого звена, голени переносимой ноги, движение начинается из левой нижней точки и сначала имеет место петлеобразная смена знака у угловой скорости в отличие от бедра переносимой ноги, у которого смена знака угловой скорости наблюдается в конце движения.

Построим фазовые портреты для длин звеньев (рис. 7).

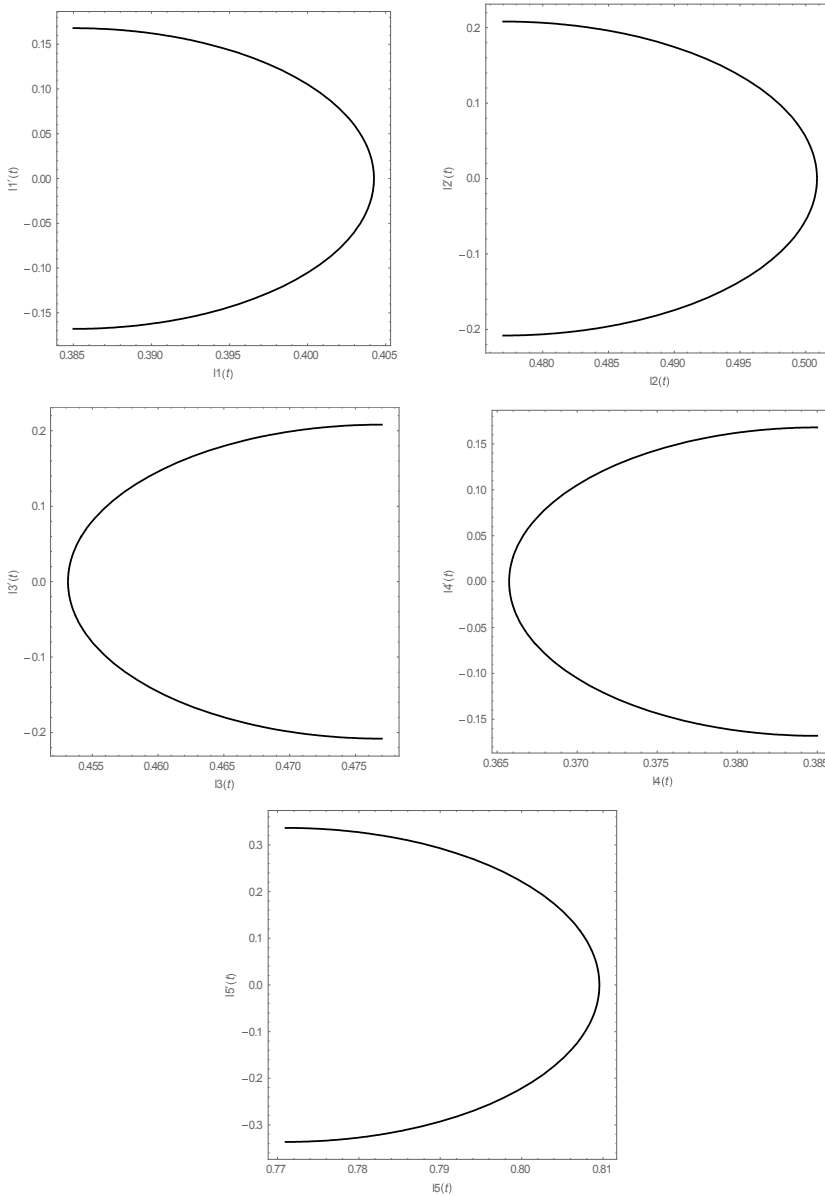


Рис. 7. Фазовый портрет изменения длины звена от ее скорости



Для первого звена, голени опорной ноги, движение по фазовой траектории начинается из левой верхней точки $l_1(0) = 0,39$ м, $\dot{l}_1(0) = 0,17$ м/с и происходит по ходу часовой стрелки. В первой половине фазы опоры на ногу скорость изменения длины звена убывает. Во второй половине фазы опоры на ногу происходит смена знака, скорость увеличивается по абсолютной величине. Примерно такая же картина наблюдается для второго и пятого звеньев.

Для третьего звена, бедра переносимой ноги, движение начинается из правой нижней точки $l_3(0) = 0,48$ м, $\dot{l}_3(0) = -0,21$ м/с и происходит по ходу часовой стрелки. Поведение аналогично звеньям опорной ноги с точностью до знака у скорости.

Аналогичное поведение и у звена четыре – голени переносимой ноги.

Все представленные фазовые траектории являются гладкими кривыми в отличие от фазовых траекторий, построенных по эмпирическим данным. Качественных совпадений между ними практически не наблюдается. Управляющие моменты и продольные силы при такой ходьбе имеют вид, представленный на рисунках 8 и 9.

Таким образом, получены зависимости динамических характеристик в рассматриваемой модели управления.

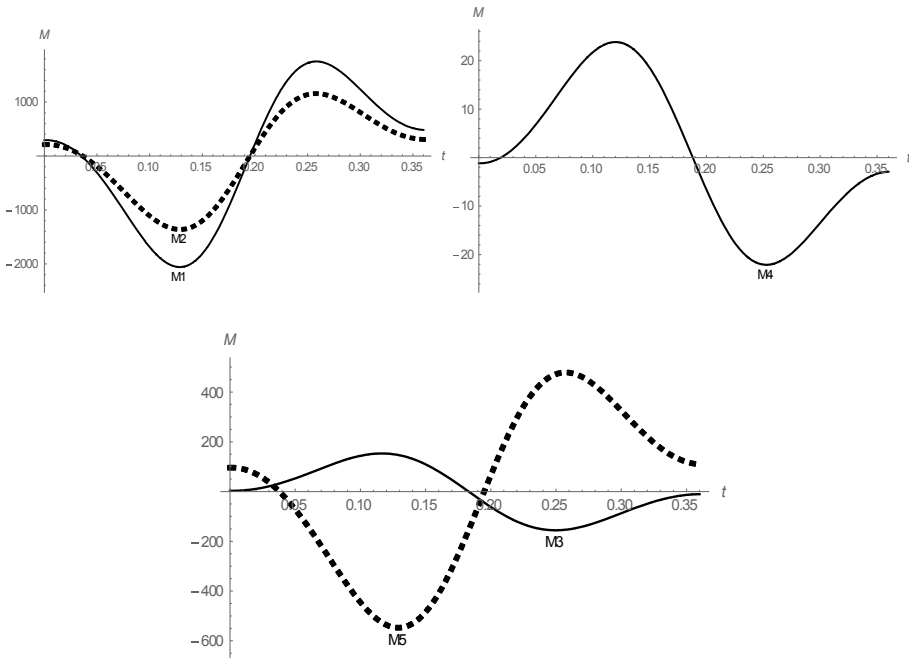


Рис. 8. Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

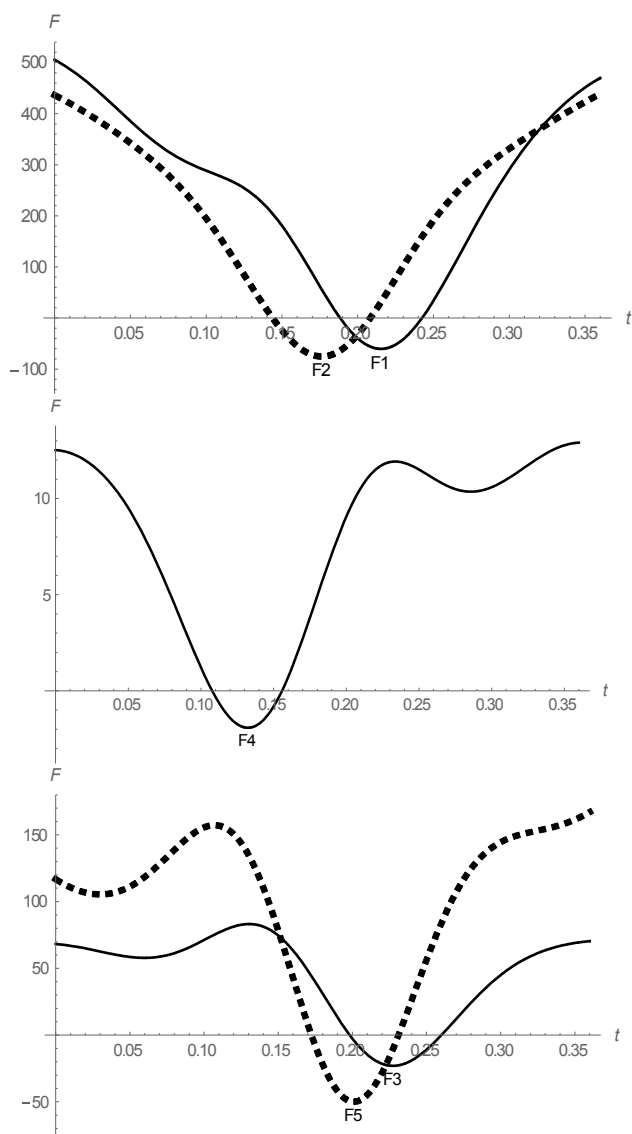


Рис. 9. Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета от времени

Заключение

Сопоставляя полученные моменты (рис. 8) с моментами, определенными эмпирическим путем (см. рис. 4) на реальных людях, видим, что качественная форма зависимостей моментов от времени сохраняется. Однако значение управляющих моментов, полученных с помощью периодических функций, больше, чем определенных на основе эмпирических данных о ходьбе человека.



При сопоставлении продольных сил наблюдается иная картина. Максимальные значения эмпирически определенных продольных сил больше, нежели задаваемых аналитически. Следовательно, при реальной ходьбе продольные нагрузки, обеспечивающие изменение длины звена, на звенья опорно-двигательного аппарата выше, чем при модельных периодических функциях.

Таким образом, учет изменения длины звена при реальной ходьбе является необходимым при создании экзоскелета вследствие значимости продольных сил и значений изменения длины звена.

В результате проведенного исследования установлено, что походка на основе теоретически задаваемых периодических функций более энергозатратна, чем реальная ходьба человека.

Этим в частности объясняется, почему энергозатраты современных экзоскелетов и антропоморфных роботов при ходьбе выше, чем у человека.

Список литературы

1. Белецкий В. В. Двуногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. М., 1984.
2. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем. Киев, 1989.
3. Борисов А. В. Динамика эндо- и экзоскелета. Смоленск, 2012.
4. Вукобратович М. Шагающие антропоморфные механизмы. М., 1976.
5. Головин В. Ф., Архипов М. В., Павловский В. Е. Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 10. С. 664–671.
6. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. М., 2012.
7. Ларин В. Б. Управление статически неустойчивыми шагающими аппаратами // Прикладная математика. 2000. Т. 36, № 6. С. 37–66.
8. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. Е. и др. Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : аннотации докладов. Казань, 20–24 августа 2015 г. Казань, 2015.
9. Питкин М. Р. Теория построения и практика синтеза антропоморфных протезов нижней конечности : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2006.
10. Фанталов Ю. И. Методы расчета и проектирования двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009.
11. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов. М., 1982.

Об авторе

Андрей Валерьевич Борисов — канд. техн. наук, доц., Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Смоленске.

E-mail: BorisowAndrej@yandex.ru

About the author

Dr Andrey Borisov, ass. prof., The Smolensk Branch of National Research University «MEI», Smolensk.

E-mail: BorisowAndrej@yandex.ru