

УДК 531/524: [57+61], 534: [57+61]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ МОТОАГРЕГАТОМ

Овсянников С.И., канд. техн. наук, доцент

*(Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова)*

Построена модель движения оператора мотоблока. Модель состоит из четырех звеньев с учетом действия шести основных мышц. Модель использована для описания движения тела оператора при управлении мотоагрегатом и развития толкающего или тормозного усилия. Определены реакции опоры и суставов, суставные моменты как функция времени.

***Ключевые слова.** Оператор мотоагрегата, реакция опоры, реакция в суставах, биомеханика.*

Постановка проблемы. Оператор мотоагрегатов (МА) выполняет не только управляющие функции, но и участвует в формировании тяговой динамики агрегата. Большинство работ, описывающих взаимодействие оператора и машины, рассматривают оператора как источник управляющего воздействия на органы управления машины [1, 2] и эргономическое взаимодействие, передача вибрации от машины к оператору, эргономичность перемещения органов управления [3-6] и т.п. Взаимодействие оператора с МА описаны в некоторых публикациях [7-9], где представлены, в основном, методика и результаты оценки физических усилий оператора, передаваемые на штанги управления.

Для моделирования процесса движения МА важно оценить тяговые (толкающие) возможности оператора, изменяющие динамику движения агрегата при движении по обработанному грунту.

Процессы моделирования движения человека рассматриваются в большинстве случаев в спортивной медицине [10] и протезировании конечностей [11-13]. Развитие толкающего или тормозного усилия происходит при взаимодействии ног оператора с опорным основанием с учетом сцепных свойств и физических нагрузок в мышечных тканях. Интенсивная физическая нагрузка, развиваемая оператором, приводит к снижению производительности МА в целом.

Целью данной работы является моделирование движения оператора при развитии толкающего усилия.

Изложение основного материала. Модель движения оператора рассмотрим как перемещение туловища с неподвижными руками, опирающимися на штанги МА (рис. 1). Модель двигательного аппарата заменим механической стержневой системой, состоящей из следующих

звеньев: 1 – ступни, 2 – голень, 3 – бедро, 4 – туловище с головой и руками. Процесс движения состоит из повторяющихся чередующихся шагов правой и левой ног. Поэтому для математического описания модели движения человека достаточно рассмотреть кинематику и динамику движения одной ноги.

Для исследования плоского движения в одноопорной фазе введем неподвижную декартовую систему координат XOZ , в которой происходит движение центров масс всего тела C_4 и отдельных его частей (рис. 2). Опорный аппарат заменим на четырех стержневой механизм с шарнирными соединениями, которые перемещаются относительно друг друга под действием сил сгибающих и разгибающих мышц F_i . Оси шарниров параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости движения. Центры масс отдельных частей тела находятся в точка C_i .

Приняты следующие упрощения и допущения:

- при движении пешком скорости перемещений конечностей незначительны, поэтому вязкостью жидкостного трения в суставах можно пренебречь;
- опорный аппарат представлен как последовательность сегментов, являющихся абсолютно твердыми стержнями; массово-геометрические параметры элементов двигательного аппарата соответствуют антропометрическим характеристикам частей тела человека и постоянны в течение рассматриваемого периода времени;
- суставы представляют собой шарниры с параллельными осями вращения, перпендикулярные плоскости движения;
- эластичностью и податливостью суставов и связок пренебрегаем в виду их незначительной деформации;

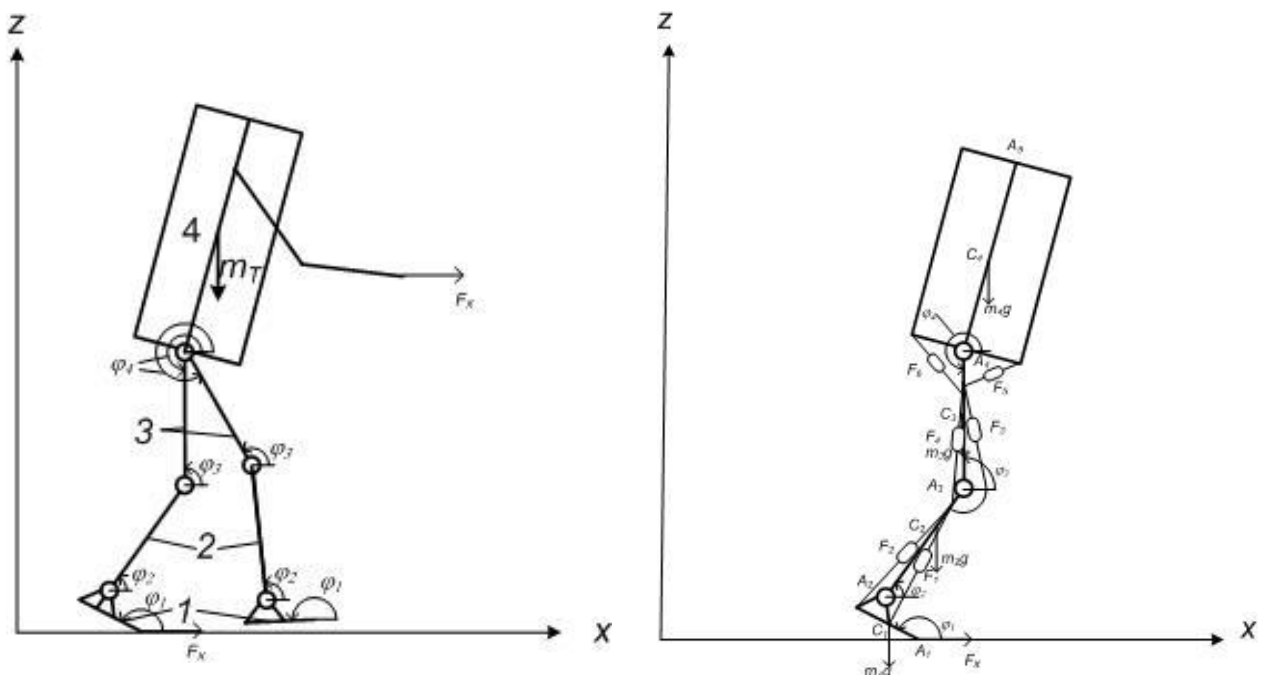
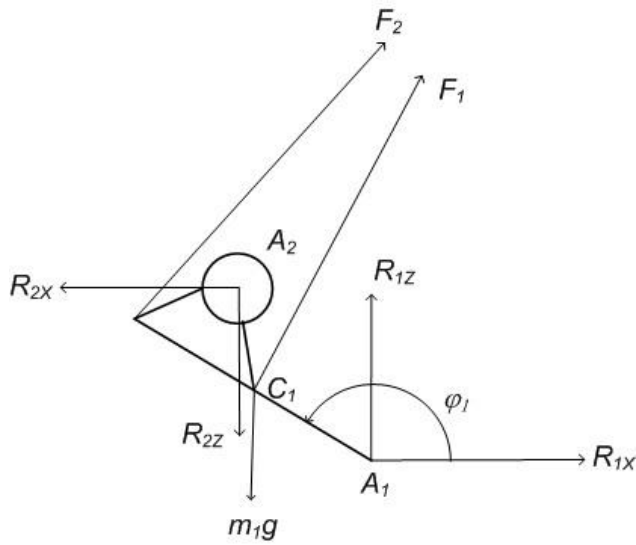
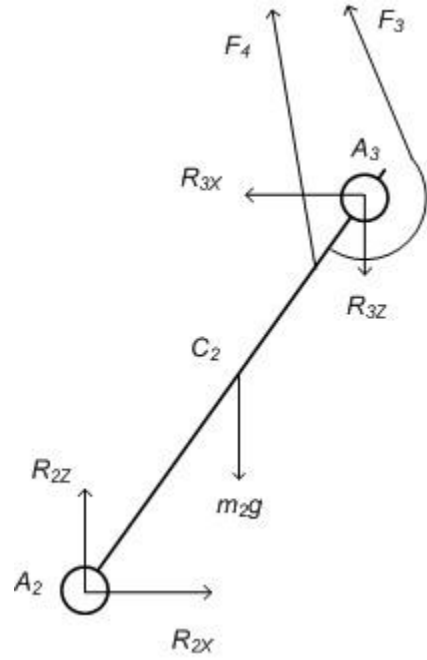


Рис. 1 - Модель плоского движения оператора МА.



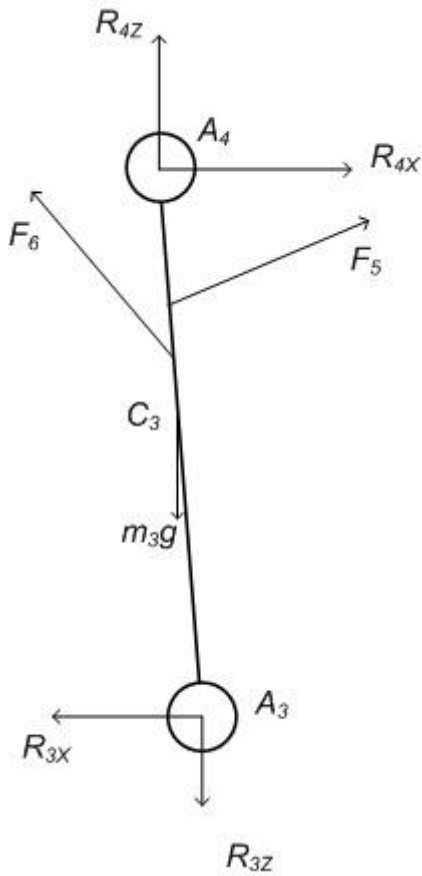
a

Рис. 2 - Модель четырех стержневого механизма прямолинейного движения ноги.

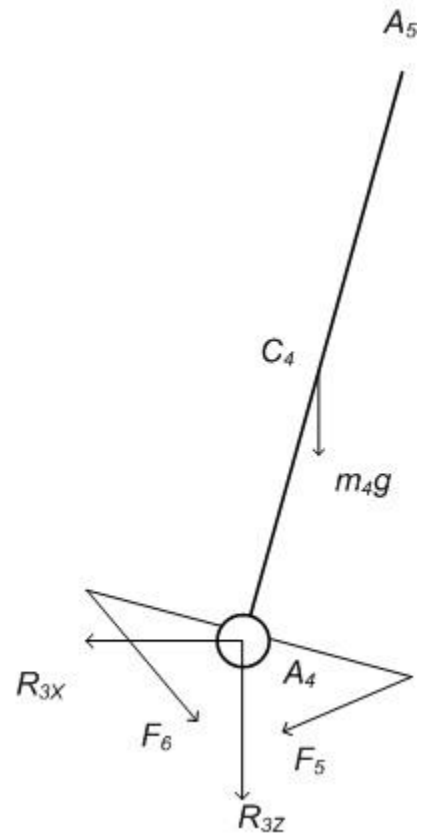


б

Рис. 3 - Силы, действующие на стопу (а) и голень (б).



a



б

Рис. 4 - Силы, действующие на бедро (а) и туловище (б).

- в модели представлены только те мышцы, которые обеспечивают прямолинейное движение.

Принятые обозначения: A_i – вершины звеньев и шарниры; C_i – центры масс звеньев; φ_i - углы между звеньями и вертикалью; F_i – мышцы, перемещающие звенья; α_i – угол приложения силы F_i .

Координаты центров масс звеньев рассчитывались по формулам:

$$x_i = l_i \cdot \sin \varphi_i + \sum_{k=1}^{i-1} (-1)^k \cdot r_i \cdot \sin \varphi_i, \quad (1)$$

$$z_i = \sum_{k=1}^{i-1} l_k \cdot \cos \varphi_k + r_i \cdot \cos \varphi_i, \quad (2)$$

где x_i, z_i – координаты центра масс i -го звена, $i = 1 \dots k$;

$A_i C_i = r_i$ – расстояние до центра масс звена;

l_k – длина соответствующих звеньев, $k = 1 \dots 4$.

Уравнения динамики плоскопараллельного движения для звеньев имеет вид:

$$m a_i = \sum \vec{F}, \quad (3)$$

$$J_i \cdot \ddot{\varphi}_i = \sum M^C, \quad (4)$$

где \vec{a}_i - ускорения центров масс звеньев системы, $i = 1 \dots 4$;

\vec{F}_i - внешние силы, действующие на данное звено;

J_i - моменты инерции звеньев относительно центра масс данного звена;

M^C – моменты внешних сил, действующих на звено.

Из выражений (3) и (4) были определены реакции в суставах, реакция опоры и суставные моменты:

$$R_{1x} = \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{x}_i + F_2 \cos(\varphi_2 - \alpha_2) - F_1 \cos(\varphi_2 + \alpha_1) \quad (5)$$

$$R_{1z} = \sum_{i=1}^4 m_i (\ddot{z}_i + g) + F_2 \sin(\varphi_2 - \alpha_2) - F_1 \sin(\varphi_2 + \alpha_1) \quad (6)$$

$$R_{2x} = \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{x}_i - F_2 \cos(\varphi_2 - \alpha_2) + F_1 \cos(\varphi_2 + \alpha_1) + F_3 \cos(\varphi_3 - \alpha_4) - F_4 \cos(\varphi_3 - \alpha_4) \quad (7)$$

$$R_{2z} = \sum_{i=1}^4 m_i (\ddot{z}_i + g) - F_2 \sin(\varphi_2 - \alpha_2) + F_1 \sin(\varphi_2 + \alpha_1) + F_3 \sin(\varphi_3 - \alpha_4) - F_4 \sin(\varphi_3 - \alpha_4) \quad (8)$$

$$R_{3x} = \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{x}_i - F_2 \cos(\varphi_2 - \alpha_2) + F_1 \cos(\varphi_2 + \alpha_1) + F_3 \cos(\varphi_4 - \alpha_3) - F_4 \cos(\varphi_4 - \alpha_4) \quad (9)$$

$$R_{3z} = \sum_{i=1}^4 m_i (\ddot{z}_i + g) - F_2 \sin(\varphi_2 - \alpha_2) + F_1 \sin(\varphi_2 + \alpha_1) - F_3 \sin(\varphi_4 - \alpha_3) + F_4 \sin(\varphi_4 - \alpha_4) \quad (10)$$

$$R_{4x} = \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{x}_i - F_4 \cos(\varphi_3 - \alpha_4) + F_3 \cos(\varphi_3 - \alpha_3) + F_5 \cos(\varphi_4 - \alpha_5) - F_6 \cos(\varphi_4 - \alpha_6) \quad (11)$$

$$R_{4z} = \sum_{i=1}^4 m_i (\ddot{z}_i - g) - F_4 \sin(\varphi_3 - \alpha_4) + F_3 \sin(\varphi_3 - \alpha_3) + F_5 \sin(\varphi_4 - \alpha_5) - F_6 \sin(\varphi_4 - \alpha_6) \quad (12)$$

$$M_2 = J_1 \ddot{\varphi} - R_{1x} r_1 \sin \varphi_1 - R_{1z} r_1 \cos \varphi_1 + R_{2x} (l_1 - r_1) \sin \varphi_1 + R_{2z} (l_1 - r_1) \cos \varphi_1 + F_2 l_2 \sin \varphi_2 - F_6 r_2 \sin \varphi_6 \quad (13)$$

$$M_3 = J_2 \ddot{\varphi}_2 - R_{2x} r_2 \sin \varphi_2 - R_{2z} r_2 \cos \varphi_2 - M_2 - R_{3x} (l_2 - r_2) \sin \varphi_2 - R_{3z} (l_2 - r_2) \cos \varphi_2 - F_4 r_2 \cos \alpha_4 + F_5 r_2 \cos \alpha_5 \quad (14)$$

$$M_4 = J_3 \ddot{\varphi}_3 - R_{2x} r_2 \sin \varphi_2 - R_{2z} r_2 \cos \varphi_2 - M_3 + F_6 l_3 \cos \alpha_6 + F_2 r_2 \cos \alpha_2 + F_4 l_3 \cos \alpha_4 \quad (15)$$

где R_{ix} R_{iz} компоненты реакции в суставах и реакции опоры, $i = 1 \dots 4$;

M_i – суставные моменты;

F_i – силы сгибающих и разгибающих мышц;

α_i – угол действия мышц к звену.

Значения масс, длин и центров масс звеньев частей тела, расстояний присоединения мышц к скелету были взяты из литературных источников [13, 14]. Значения были взяты для здорового мужчины среднего возраста [15, 16].

В результате решения системы уравнений движения получены зависимости угловых перемещений от времени. По ним проведено анимационное моделирование движения (рис. 5). Сопоставляя с анимационными моделями видно, что расчетное движение аналогично реальному.

С помощью формул (5)–(15) и полученных зависимостей изменения углов звеньев от времени были определены моменты и реакции в суставах и реакция опоры, представленные на рис. 6. Реакция опоры сильно изменяется в процессе шага и достигает максимума в момент времени $t \approx 0,2$ с.

Вывод: Построенная модель движения человека при управлении МА представляет собой четырехзвенную конструкцию, состоящую из жестких стержней, соединенных шарнирами. Перемещение стержней осуществляется под действием сокращения основных групп мышц ног человека. С помощью математической модели определены реакции опоры, реакции в суставах и

суставные моменты. Данная модель применяется для анализа силового взаимодействия оператора с МА. В дальнейших исследованиях планируется использовать модель для оценки сцепных свойств человека с опорным основанием.

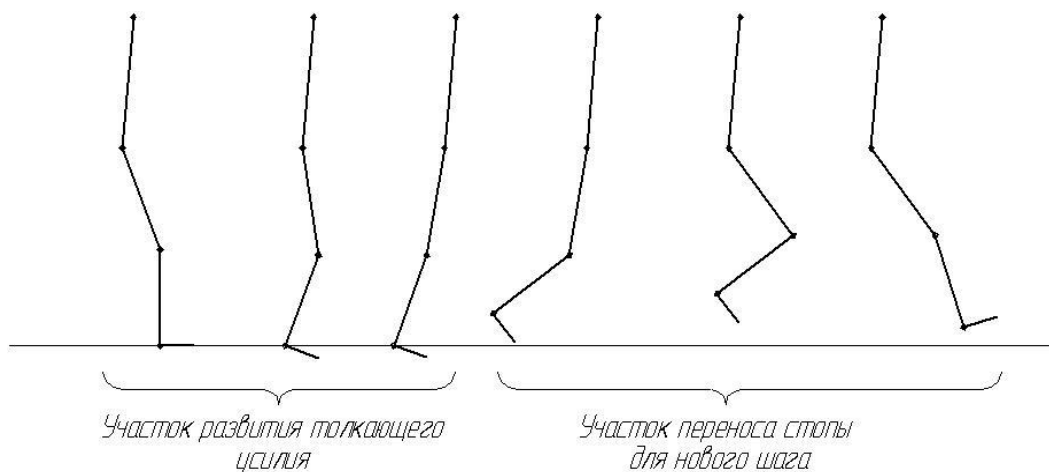


Рис. 5 - Анимация движения

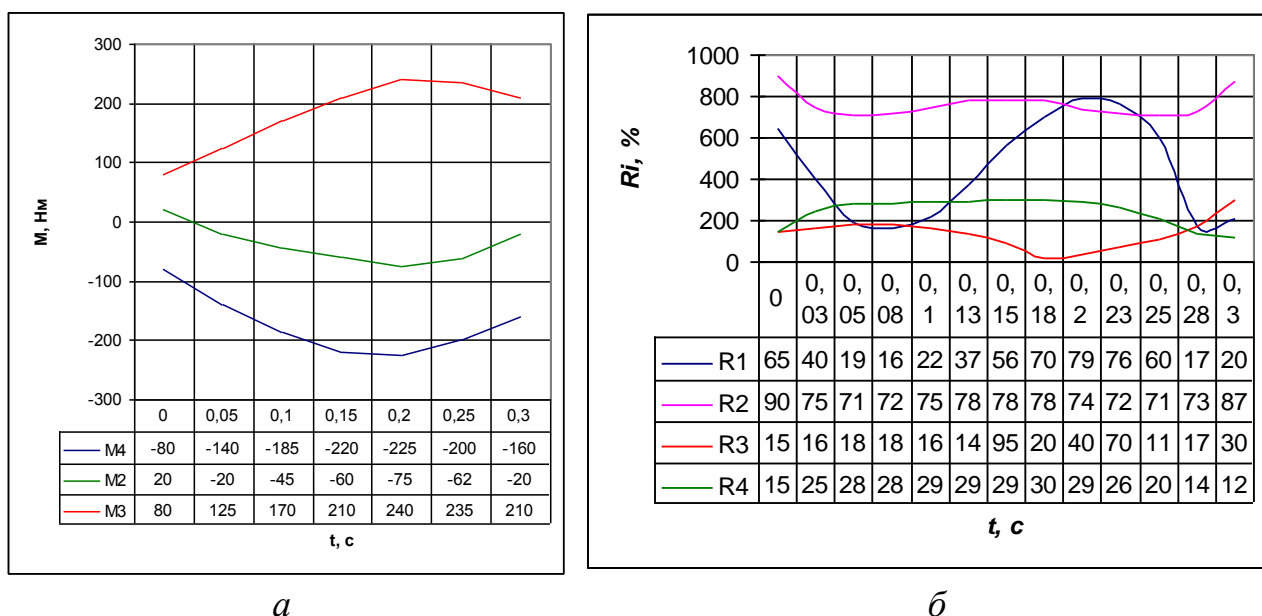


Рис. 6 - Суставные моменты (а), реакция опоры R1 и реакции в суставах (б) (% от веса тела).

Список литературы

1. Келлер Н.О концепции развития мобильной мини-техники на современном этапе / Н. Келлер, А. Цветков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003, № 4. - С. 7-10.
2. Овсянников С., Ремарчук Н. Аспекты функциональной стабильности агрегатов на базе мотоблоков / С. Овсянников, Н. Ремарчук // Сільськогосподарські машини : Зб. наук. статей – Вип. 20. – Луцьк : Ред. – вид. відділ ЛНТУ, 2010. – С. 234 – 242.

3. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1980. – 275 с., с ил.
4. Носов С.В., Киндюхин Ю.Ю. Моделирование системы дорога-трактор-водитель с учетом сглаживания шины микропрофиля опорного основания // Тракторы и сельхозмашины. 2009, № 10, - С. 12 – 15.
5. Волошин Ю.Л. Математические модели колебаний колесных транспортных и тягово-транспортных средств // Тракторы и сельхозмашины. 2007. № 6. – С. 37-43.
6. Герасимов М.Д., Мкртычев О.В., Герасимов Д.М. Методика определения величины разбалансировки направленных колебаний планетарного вибратора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №1. С. 107 – 111.
7. Овсянников С.І. Методика визначення енерговитрат оператора під час керування мотоагрегатом / С.І. Овсянников // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей – Вип. 25. – Луцьк: Ред.- вид. відділ ЛНТУ, 2013. – С. 93 - 101.
8. Duane Knudson. Fundamentals of Biomechanics/ Second edition / California State University at Chico, USA. Springer, 2007. – P. 343.
9. Физиология мышечной деятельности: Учебник для институтов физической культуры /Под ред. Коца Я.М. - М.: Физкультура и спорт, 1982. - 347 с.
10. Горшакова Н. Фармакология спорта / [Н. Горшакова, Я. Гудивок, Л. Гунина и др.]; под общ. Ред. С. Олейник, Л. Гуниной, Р. Сейфулы. – К. : Олимп. 1-ая, 2010. – 640 с.
11. Чигарев А.В., Борисов А.В. Моделирование управляемого движения двуногого антропоморфного механизма // Российский журнал биомеханики. 2010. Т. 15, № 1. С. 74 – 78.
12. Виталий Гамалий. Координация мышечных напряжений как составляющая техники двигательных действий человека // Наука в спорте.
13. Bobbert M.F., van Ingen Schenau G.J. Coordination in Vertical Jumping // J. Biomechanics. – 1988. – Vol. 21, no. 3. – P. 249-262.
14. Van Soest A.J., Bobbert M. F. The Contribution of Muscle Properties in the Control of Explosive Movements // Biological Cybernetics. – 1993. – P. 195-204.
15. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зациорский [и др.]. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.
16. Герман И. Физика организма человека. Пер. с англ.: Научное издание / И. Герман. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 992 с.

Анотація

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ОПЕРАТОРА ПІД ЧАС КЕРУВАННЯ МОТОАГРЕГАТОМ

Овсянников С.І.

Побудовано модель руху оператора мотоагрегата. Модель складається з чотирьох ланцюгів з урахуванням дії шості основних м'язів. Модель використана для описання руху тіла оператора під час керування мотоагрегатом та створення зусилля штовхання або гальмування. Визначені реакції опори та в суглобах, моменти в суглобах в залежності від часу руху.

***Ключові слова.** Оператор мотоагрегату, реакція основи, реакція в суглобах, біомеханіка.*

Abstract

A DESIGN OF MOTION OF OPERATOR IS DURING A MANAGEMENT OF TWO-WHEEL TRACTOR

Ovsyannikov S.

The model of motion of operator is built of two-wheel tractor. A model consists of four links taking into account the action of six basic muscles. A model is used for description of motion of body of operator at a management two-wheel tractor and development of pushing or brake effort. The reactions of support and joints, a moment is in joints, are certain depending on time.

***Keywords.** An operator of two-wheel tractor, reaction of support, reaction is in joints, biomechanics.*