

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Дворников Л.Т., Живаго Э.Я., Шубин Е.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

**Ключевые слова:** синтез кинематических цепей, структурная система, механическая система, нижняя конечность человека, скелет человека, общая подвижность, подвижность, механизм, пространственный механизм.

**Аннотация.** В данной статье решается задача определения общей подвижности нижней конечности скелета человека. Данная задача решается использованием универсального метода синтеза кинематических цепей любой сложности. Показана поэтапно методика решения подобных задач. Представлена схема с указанием анатомических названий и изображена подвижность кинематических пар. Данная статья является одним из первых этапов в понимании анатомии скелета человека с точки зрения теории механизмов и машин, как науки о кинематических парах.

В работе [1] одним из авторов настоящей статьи был изложен универсальный метод синтеза кинематических цепей любой сложности, основанный на применении системы из трех уравнений вида

$$\begin{cases} \sum p_k = \tau + (\tau - 1) \cdot n_{\tau-1} + \dots + i \cdot n_i + \dots + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1 + n_0, \\ W = 6 \cdot n - \sum_5^1 k \cdot p_k, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau$  – число геометрических элементов наиболее сложного звена цепи, называемого  $\tau$  – угольником,

$n_i$  – число звеньев, добавляющего в цепь по  $i$  кинематических пар,

$k$  – класс кинематических пар,

$p$  – число кинематических пар,

$W$  – подвижность кинематической цепи.

Опыт применения системы (1) во многих частных случаях показал ее пригодность для самых разных частных задач.

Обратимся, используя систему (1), к анализу подвижности скелета человека, в частности к определению подвижности его нижней конечности.

Из анатомии человека известно, что его нижняя конечность состоит из 30 костей, две пятиугольных, шесть четырехугольных, пять треугольных, одиннадцать «двухугольных», шесть «одноугольных». Все эти кости и их анатомические названия приведены на рисунок 1. Они связываются между собой в 39 соединений – кинематических пар[1].

Из приведенного рисунка видно, что наиболее сложными костями по количеству их геометрических элементов – кинематических пар. являются ладьевидная и кубовидная кости. За  $\tau$  – угольник (пятиугольник) принимаем

кубовидную кость, наиболее сложное звено, которая развивается у человека раньше, чем ладьевидная.[2]

Структурная система нижней конечности человека может быть представлена в виде

$$\begin{cases} p = 5 + 4n_4 + 3n_3 + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_4 + n_3 + n_2 + n_1 + n_0, \\ W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1. \end{cases} \quad (2)$$

Согласно рисунок 1 скелета ноги человека, она состоит из тридцати костей ( $n = 30$ ) соединенных в тридцать девять кинематических пар ( $p = 39$ ). Учтем, что в механической системе человеческого скелета не используются пары первого и второго классов, т.е.  $p_1 = 0$  и  $p_2 = 0$ . С учетом этого систему (2) упростим до вида

$$\begin{cases} 39 = 5 + 4n_4 + 3n_3 + 2n_2 + n_1, \\ 30 = 1 + n_4 + n_3 + n_2 + n_0, \\ W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3. \end{cases} \quad (3)$$

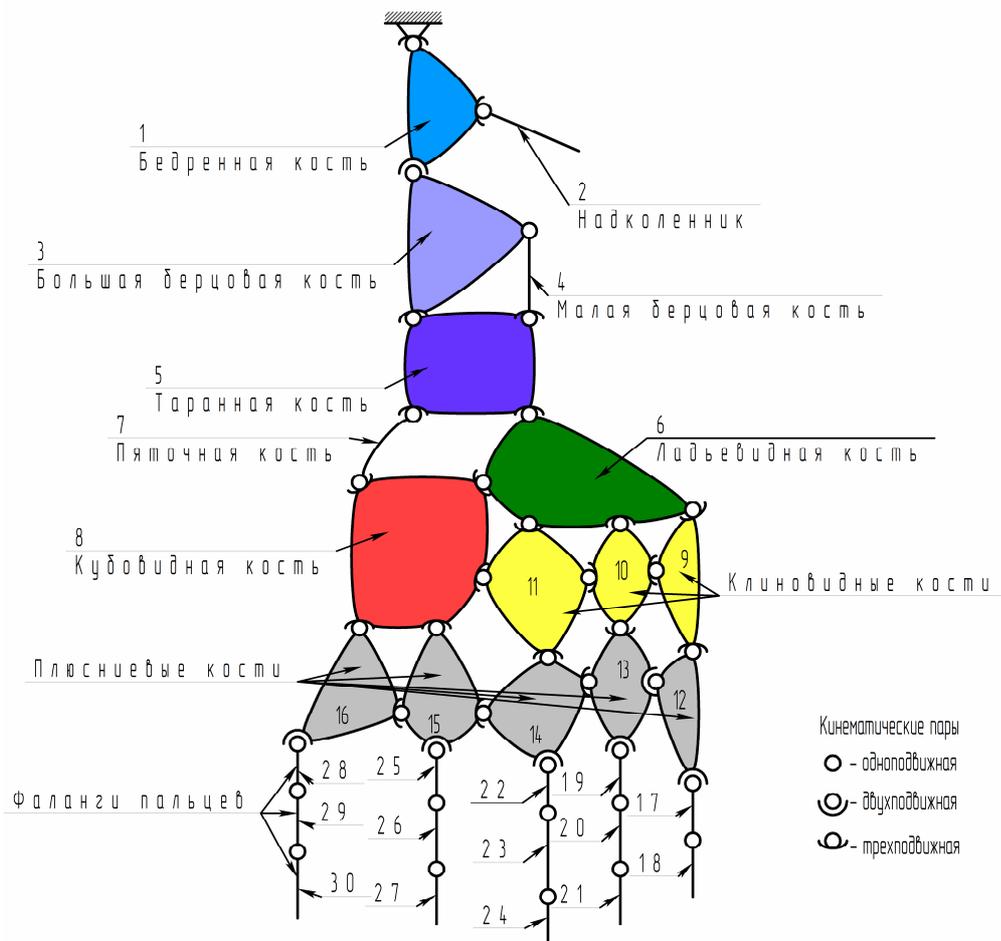


Рисунок 1 – Структурная схема нижней конечности

Рассмотрим первые два уравнения системы (3)

$$\begin{cases} 4n_4 + 3n_3 + 2n_2 + n_1 = 34, \\ n_4 + n_3 + n_2 + n_1 + n_0 = 29. \end{cases} \quad (4)$$

Поставим задачу определения общей подвижности такой цепи.

Прежде всего, обратимся к звеньям  $n_0$ , которые не добавляют в цепь кинематических пар. Их всего шесть. Это последние фаланги пальцев и надколенник, звенья 18, 21, 24, 27, 30 и 2.

Используем способ представления каждого слагаемого (4) в виде  $n_j^i$ , где  $j$  определяет число добавляемых звеном кинематических пар, а  $i$  общее число пар звена, и представим их в виде  $n_4^5 = 1$ ,  $n_3^4 + n_2^4 + n_1^4 = 6$ ,  $n_2^3 + n_1^3 = 5$ ,  $n_1^2 = 11$ ,  $n_0^1 = 6$ . С учетом принятых значений, первое уравнение (4) запишется в виде

$$n_4^5 + n_3^4 + n_2^4 + n_1^4 + n_2^3 + n_1^3 + n_1^2 + n_0^1 = 34. \quad (5)$$

Что касается звеньев  $n_0^1$ , то все они определены и названы выше. Звенья  $n_1^2$  могут быть определены по рисунку 1. Это звенья 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 28, 4, 7 и 29. Их одиннадцать. С учетом этого уточнения, (5) преобразуются к виду

$$n_4^5 + n_3^4 + n_2^4 + n_1^4 + n_2^3 + n_1^3 = 12. \quad (6)$$

Представим (6) в виде

$$n_4 + n_3 + n_2 + n_1 = 12. \quad (7)$$

При этом будем иметь ввиду, что  $n_4 = n_4^5$ ,  $n_3 = n_3^4$ ,  $n_2 = n_2^4 + n_2^3$ ,  $n_1 = n_1^4 + n_1^3$ .

В зависимость (7) входят звенья с 1 по 16, исключая звенья 2, 4, 7. С учетом  $\tau$  – угольника (звено 8), таких звеньев 13.

Подставим во второе уравнение системы (4)  $n_0 = 6$  и решим его относительно  $n_1$

$$n_1 = 23 - n_4 - n_3 - n_2. \quad (8)$$

Подставляя далее (8) в первое уравнение системы (4), найдем, что

$$3n_4 + 2n_3 + n_2 = 11,$$

откуда  $n_2 = 11 - 3n_4 - 2n_3$ , или с учетом (6)

$$n_2^4 + n_2^3 = 8 - 2n_3^4.$$

Решим (7) относительно  $n_1$ , с учетом  $n_4$ ,  $n_1 = 12 - n_3 - n_2$  и тогда получим

$$n_1^4 + n_1^3 = 8 - 2n_3^4.$$

Учтем, что, образуя замкнутые контуры, трехпарные, четырехпарные и пятипарные звенья могут добавлять в цепь лишь по одной паре, на основании (5) запишем, что  $n_2^3 = 1$ ,  $n_1^3 = 4$ , и  $n_4^5 = 1$ .

В этом случае система (4) запишется в виде

$$\begin{cases} 2n_3 + n_2 = 8, \\ n_3 + n_2 = 5. \end{cases} \quad (9)$$

Решением системы (9) является  $n_3 = n_3^4 = 2$  и  $n_2 = 4$ .

Объединяя найденные решения с полученными выше  $n_4 = 1$ ,  $n_3 = 2$ ,  $n_2 = 4$ ,  $n_1 = 5$ , мы получим количества всех звеньев  $n_4^5 = 1$ ,  $n_3^4 = 2$ ,  $n_2^4 = 3$ ,  $n_1^4 = 1$ ,  $n_2^3 = 1$ ,  $n_1^3 = 4$ ,  $n_1^2 = 11$ ,  $n_0^1 = 6$ .

Теперь общая подвижность нижней конечности человека определится системой

$$\begin{cases} W = 6 \cdot 18 - 4p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ p_5 + p_4 + p_3 = 19, \end{cases}$$

где  $p_5 = 10$  – это соединения фалангов, а также соединение берцовых костей между собой,

$p_4 = 7$  – это соединения фалангов с плюсневыми костями, а также большой берцовой кости с таранной и бедренной,

$p_3 = 2$  – это соединение бедренной кости с тазовыми, а также соединение малой берцовой кости с таранной.

Таким образом, механическая цепь нижней конечности человека, имеет общую подвижность  $W = 24$ .

### Список литературы

1. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов: учеб. пособие. – Новокузнецк: Изд-во СибГГМА, 1994. – 102с.
2. Сапин М.Р., Билич Г.Л. Анатомия человека. В 2-х книгах. – М.: Оникс, 2002. – 152с.

### RESEARCH OF THE STRUCTURE OF THE LOWER LIMB OF THE PERSON

*Dvornikov L.T., Zhivago E. Ya., Shubin E.E.*

**Keywords:** synthesis of kinematic chains, structural system, mechanical system, lower limb of man, human skeleton, shared mobility, mobility, mechanism, spatial mechanism.

**Abstract.** This article solves the problem of determining the total mobility of the lower limb of the human skeleton. This problem can be solved using the generic method of synthesis of kinematic chains of any complexity. Demonstrate methods of solving such problems. Presents a chart indicating the anatomical names and shows the mobility of kinematic pairs. This article is one of the first steps in understanding the anatomy of the human skeleton from the point of view of the theory of mechanisms and machines, as the science of kinematic pairs.

### Refernces

1. Dvornikov L.T. The beginnings of the theory of the structure of mechanisms: proc. allowance. – Novokuznetsk: Publ. house SibGGMA, 1994. – 102 p.
2. Sapin M.R., Bilic G.L. Human Anatomy. In 2 books. – M.: Onyx, 2002. – 152 p.