

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СПОРТСМЕНА – ПРОЦЕСС СВЕДЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ДВИЖЕНИЯ К ПОИСКУ РАЦИОНАЛЬНЫХ ФОРМ РЕШЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

В.И. Загrevский¹, В.О. Загrevский², О.И. Загrevский²

¹Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова, Республика Беларусь,
zvi@tut.by

²Томский государственный университет, Россия, O.zagrevsky@yandex.ru

Введение. Одной из концептуальных идей основоположников отечественной школы биомеханики физических упражнений, в частности, отмечаемые в работах Н.А.Бернштейна, является тезис о «преодолении» избыточных степеней свободы (ИСС) органов движения, т.е. к превращению этих органов в управляемые системы. По Н.А.Бернштейну [1] биомеханическая дифференциация систем движений в области физического воспитания подразделяется на два типа ИСС:

- 1) зависящие от свойств подвижности органа – это кинематические СС.
- 2) зависящие от особенностей силового "обслуживания" – это динамические СС.

Первый тип избыточных степеней свободы регламентируется анатомическими возможностями организма спортсмена к проявлению подвижности и гибкости в позвоночнике и в различных суставах. Второй тип избыточных степеней свободы регламентируется силовыми способностями мышц, окружающих суставы спортсмена и определяющих уровень его силового потенциала.

Выделение "органов движения" закономерно для существующего механического подхода, согласно которому опорно–двигательная система, например, тело человека, представляется кинематической схемой в виде многосвязной системы шарнирно связанных твердых тел. В этом случае орган движения представляется сегментом тела человека или звеном, динамически доопределяемый масс–упруго–вязкими компонентами и действующими внешними и внутренними силами.

Прямые задачи управления такими динамическими системами развиваются в рамках классических формализмов (Лагранжа, Гамильтона, Гаусса и др.) с привлечением современных методов теории оптимального управления (принципа максимума Понтрягина, метода динамического программирования Беллмана, метод глобально–локальных вариаций в пространстве управлений и др.). При таком подходе, реализованным в робото–технических и других технических системах, а также в ряде биомеханических исследований [2] задача управления естественным образом распадается на несколько технологических этапов:

1. Задание целевого функционала движения, определяющего качество оптимизируемого процесса (в математической форме представляется любой из биомеханических характеристик движения адекватно отражающей цель движения в кинематическом или динамическом аспектах).
2. Кинематический синтез оптимального управления и формирование целевой траектории пространственного образа потребного движения.
3. Определение динамических ресурсов управления и энергетических затрат при реализации оптимальных (проектируемых прогностических) движений.

Второй и третий технологические этапы формально соответствуют двум типам ИСС по Н.А.Бернштейну. Однако это соответствие кажущееся и не отражает концепцию Н.А.Бернштейна об ограничении числа степеней свободы в процессе совершенствования двигательного навыка. За разъяснением этого тезиса обратимся к трудам и теории одного из основоположников классической механики: Ж.Лагранжу.

Мышлению Лагранжа были чужды философские умозрения, не ведущие к конкретному результату [2]. Но это не означало, что он вообще не интересовался проблемами обоснования понятий механики и анализа их. Введение в науку метода обобщенных координат было бы немислимо, если бы Лагранж не вникал в философские рассуждения Эйлера об определении положения тел относительно друг друга.

Несомненная заслуга Лагранжа перед человечеством заключается в том, что он сформулировал и разъяснил истинный смысл общих уравнений динамики и придал им такую форму, которая оказалась пригодной и в других областях знаний, за пределами механики. Он первый показал и доказал, что в механических системах, подчиненных голономным связям, эти связи играют роль сил. Пусть имеем N материальных точек с координатами (x_i, y_i, z_i) и пусть эти точки связаны между собой так, что существуют n уравнений (голономные связи) вида $f_s(x_i, y_i, z_i)$. Тогда число свободных координат будет $S = 3N - n$.

Следовательно, для того чтобы система была полностью определена, необходимо задать S произвольных координат, после этого положение всех точек системы будет определено. Количество S носит название числа степеней свободы. Значение этого понятия в физических и механических явлениях огромно. Указанные свободные координаты, определяющие положение системы, Лагранж назвал обобщенными координатами, и в настоящее время их принято обозначать через символ q_i .

Следующий шаг, который делает Лагранж, поражает своей красотой и удивительной ясностью. Он рассматривает систему из N материальных точек как свободную от связей и к числу координат q_i , отвечающих числу степеней свободы, прибавляет столько обобщенных координат, сколько имеется связей. В качестве этих дополнительных координат служат сами функции связей. Таким образом, вместо $3n$ остается только $3n - s$ уравнений, выражающих движение системы в независимых координатах $q_{s+1}, q_{s+2}, \dots, q_{s+3}$, как если бы связей не было.

Методы исследования. Для примера рассмотрим кинематическую схему трехзвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека (рис.). Здесь: руки – первое звено, туловище с головой – второе звено, ноги – третье звено.

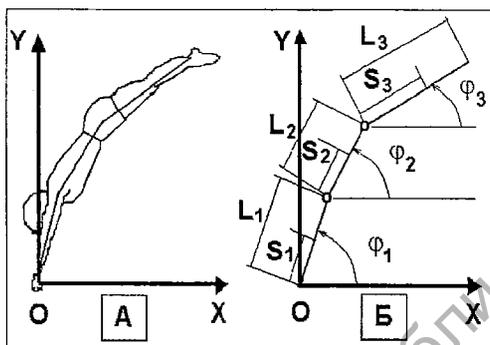


Рисунок – Кинематическая схема трехзвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека

С помощью данной модели можно исследовать кинематику и динамику вращательных движений спортсмена в условиях опоры. В процессе выполнения упражнений спортсмен не теряет контакта с опорой, к примеру, с грифом перекладины. Поэтому расположим кисти рук спортсмена в начале неподвижной системы координат Оху, а ее в свою очередь совместим с торцом грифа перекладины.

На принятую модель наложены ограничения:

1. Звенья тела человека и гриф перекладины считаются абсолютно твердыми телами.
2. Суставы, посредством которых звенья тела человека соединяются друг с другом, моделируются цилиндрическими шарнирами.
3. Трение в шарнирах отсутствует.
4. Центры масс звеньев модели расположены на прямой, соединяющей их оси вращения в шарнирах (на продольной оси звена).

Для принятой модели введем следующие обозначения: L_i – длина i -го звена; S_i – расстояние от оси вращения i -го звена до его центра масс; φ_i – угол наклона i -го звена к оси Ох (обобщенные координаты i -го звена); $\dot{\varphi}_i$ – угловая скорость i -го звена; $\ddot{\varphi}_i$ – угловое ускорение i -го звена; i – буквенный индекс, используемый для обозначения номера звена ($i=1, 2, \dots, N$); N – количество звеньев модели.

В связи с тем, что за обобщенные координаты биомеханической системы приняты φ_i , то $\dot{\varphi}_i$ и $\ddot{\varphi}_i$ соответственно будут обозначать обобщенную скорость и обобщенное ускорение i -го звена. Для обозначения масс-инерционных характеристик рассматриваемой трехзвенной модели опорно-двигательного аппарата тела спортсмена введем следующие идентификаторы: P_i – вес i -го звена; m_i – масса i -го звена; J_i – центральный момент инерции i -го звена.

В развернутой записи формульные выражения уравнений целенаправленного движения нераз-

ветвленной трехзвенной модели биомеханической системы, представленные в форме уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид

$$\begin{aligned}
 & A_{11}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{12}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{13}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) - \\
 & - A_{11}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{12}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - A_{13}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) + \\
 & + Y_1 \cos \varphi_1 = M_1 - M_2; \\
 & A_{21}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + A_{22}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_2) + A_{23}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) - \\
 & - A_{21}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - A_{22}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_2) - A_{23}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) + \\
 & + Y_2 \cos \varphi_2 = M_2 - M_3; \\
 & A_{31}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + A_{32}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + A_{33}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_3) - \\
 & - A_{31}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) - A_{32}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) - A_{33}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_3) + \\
 & + Y_3 \cos \varphi_3 = M_3.
 \end{aligned} \tag{1}$$

В уравнениях движения (2) коэффициенты A_{ij} характеризуют масс-инерционный и кинематический компоненты отдельных звеньев биомеханической системы: массы (m_i), моменты инерции (J_i), длины (L_i) и положение центра масс (S_i) на продольной оси звена. Таким образом, в численных значениях динамических коэффициентов звеньев биомеханической системы (A_{ij}), учитываются антропометрические особенности сегментов и звеньев опорно-двигательного аппарата тела спортсменов. В развернутой записи, для принятой трехзвенной модели биомеханической системы, коэффициенты A_{ij} имеют вид

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= J_1 + m_1 S_1^2 + L_1^2 (m_2 + m_3); \\
 A_{12} &= L_1 (m_2 S_2 + m_3 L_2); \\
 A_{13} &= m_3 S_3 L_1; \\
 A_{21} &= A_{12}; \\
 A_{22} &= J_2 + m_2 S_2^2 + m_3 L_2^2; \\
 A_{23} &= m_3 S_3 L_2; \\
 A_{31} &= A_{13}; \\
 A_{32} &= A_{23}; \\
 A_{33} &= J_3 + m_3 S_3^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

Содержательный смысл коэффициентов Y_i , содержащихся в левой части уравнений, заключается в том, что они представляют собой выражения для определения обобщенных сил в уравнениях Лагранжа и в развернутой записи имеют вид

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= (P_1 S_1 + P_2 L_1 + P_3 L_1); \\
 Y_2 &= (P_2 S_2 + P_3 L_2); \\
 Y_3 &= (P_3 S_3).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, в рассматриваемой трехзвенной биомеханической модели движения спортсмена за обобщенные координаты приняты углы наклона звеньев к оси Ох. Их количество соответствует количеству звеньев модели. При условии, что в качестве управляющих функций оптимального управления мы можем рассматривать управление на кинематическом и динамическом уровнях [3] введем в уравнения движения рассматриваемой биомеханической системы управление на кинематическом уровне в форме изменения суставных углов по времени.

Результаты исследования и их обсуждение. Так как программное управление задано в форме изменения суставных углов по времени, то его можно представить в виде функциональной зависимости от разницы обобщенных координат по времени. Запишем общую структуру управляющих воздействий в виде

$$u_z = \varphi_{z+1} - \varphi_z; \quad \dot{u}_z = \dot{\varphi}_{z+1} - \dot{\varphi}_z, \quad \ddot{u}_z = \ddot{\varphi}_{z+1} - \ddot{\varphi}_z; \quad z=1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (4)$$

где запись u_z означает изменение разницы обобщенных координат $\varphi_{z+1} - \varphi_z$ по времени на всей траектории биосистемы.

Обобщенных координаты модели и их первая и вторая производные по времени определяются через неизвестное φ_1 и программные управления u_z

$$\varphi_p = \varphi_1 + \sum_{z=1}^{p-1} u_z, \quad \dot{\varphi}_p = \dot{\varphi}_1 + \sum_{z=1}^{p-1} \dot{u}_z, \quad \ddot{\varphi}_p = \ddot{\varphi}_1 + \sum_{z=1}^{p-1} \ddot{u}_z, \quad p=2, 3, \dots, N \quad (5)$$

Уравнения целенаправленного движения биомеханической системы получим, введя кинематические связи (5) в уравнения движения (1). Выполнив необходимые преобразования, имеем следующую запись для i -го уравнения системы:

$$\sum_{j=1}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) + \sum_{z=j+1}^N A_{iz} \sum_{k=1}^{z-1} \dot{u}_k \cos(\varphi_z - \varphi_i) - \sum_{j=1}^N A_{ij} (\dot{\varphi}_1 + \sum_{k=1}^{j-1} \dot{u}_k)^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) = \\ = M_i - M_{i+1} - Y_i \cos \varphi_i; \quad j=1, \dots, N; \quad z=2, \dots, N-1; \quad k=1, \dots, N-1. \quad (6)$$

Система уравнений (6) разрешима относительно $\ddot{\varphi}_1$ любым из способов, известных в теории матричных операций и линейных уравнений. Окончательное решение системы уравнений (6) имеет вид

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{M_1 - \sum_{i=1}^N Y_i \cos \varphi_i + \sum_{j=2}^N A_{1j} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_1) - \sum_{k=1}^N A_{1k} \dot{\varphi}_k^2 \sin(\varphi_k - \varphi_1)}{\sum_{i=1}^N A_{i,1} \cos(\varphi_1 - \varphi_i)}. \quad (7)$$

Выводы. Многочисленные вычислительные эксперименты, выполненные по синтезу оптимального управления методом глобально-локальных вариаций в пространстве управлений [3], с использованием уравнения (7) показали, что:

1. В результате оптимизации количество степеней свободы биомеханической системы не уменьшается. Для каждого соревновательного упражнения число степеней свободы звеньев тела спортсмена определяется количеством управляющих функций, ограничивающих кинематику сгибательно-разгибательных движений в суставах исполнителя на формируемой траектории биосистемы. Следовательно, процесс совершенствования двигательного навыка связан не с ограничением числа степеней свободы звеньев тела спортсмена, а с формированием адаптивного управления, эффективно реализующего цель движения и успешно решающего частные двигательные задачи каждой фазы упражнения.

2. В каждом цикле итерационного процесса оптимизации синтезируемого двигательного действия кинематика и динамика управляющих функций последовательно изменяется и шаг за шагом приближается к искомому оптимальному управлению, с учетом индивидуальных антропометрических, масс-инерционных характеристик звеньев тела спортсмена и кинематических и динамических ресурсов опорно-двигательного аппарата исполнителя.

3. При наложении ограничений на силовые ресурсы биосистемы, определяемые уровнем развития двигательных (силовых) качеств исполнителя, ограничения на кинематические ресурсы определяются правилами соревнований и индивидуальными анатомическими условиями выполнения упражнений (гибкость в позвоночнике и подвижность в суставах).

Следовательно, концепция Н.А.Бернштейна о «преодолении» избыточных степеней свободы органов движения, в наших исследованиях не нашла подтверждения. Речь в данном случае может идти не об уменьшении избыточного количества степеней свободы, а о сокращении бесконечно большого количества возможных вариантов траекторий управления (вывод 2) в процессе совершенствования системы движений. Следовательно, техническая подготовка спортсменов основана

на постепенном и последовательном приближении и сведении возможных многочисленных вариантов движений к такому управлению, которое при наложенных ограничениях на кинематическую и динамическую структуру управляющих действий наиболее эффективно реализует цель движения и успешно решает частные двигательные задачи каждой фазы упражнения.

Таким образом, в настоящее время техническая подготовка спортсменов представляет собой педагогический процесс практического поиска и синтеза оптимального управления в движениях биомеханических систем, основанного в большей степени на методе «проб и ошибок» и в редких случаях использующего прогностические формы движений с заранее заданными и известными для исполнителя свойствами.

Литература:

1. Бернштейн, Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности / Н.А.Бернштейн. – М.: Медицина, 1966. – 349 с.
2. Бутенин, Н.В. Введение в аналитическую механику / Н.В. Бутенин – М.: Наука, 1971. – 264 с.
3. Загrevский, В.И. Построение оптимальной техники спортивных упражнений в вычислительном эксперименте на ПЭВМ: монография / В.И. Загrevский, Д.А. Лавшук, О.И. Загrevский. – Могилев: МГУ им. А.А.Кулешова, 2000. – 190 с.