

Нормализация биологических ритмов позволяет осуществлять интенсивные физические нагрузки, а тренировки при нарушенном биологическом ритме приводят к различным функциональным расстройствам (например, десинхронозу – рассогласованию суточных ритмов организма с показателями времени внешней среды), а иногда и к заболеваниям [1].

Наука о биологических ритмах имеет огромное практическое значение и для медицины. Появились новые понятия: хрономедицина, хронодиагностика, хронотерапия, хронопрофилактика, хронопатология, хронофармакология и др.

Эти понятия связаны с использованием фактора времени, биоритмов в практике лечения больных. Ведь физиологические показатели одного и того же человека, полученные утром, в полдень или глубокой ночью, существенно отличаются, их можно трактовать с различных позиций. Стоматологи, например, знают, что чувствительность зубов к болевым раздражителям максимальна к 18 часам и минимальна вскоре после полуночи, поэтому все наиболее болезненные процедуры они стремятся выполнить утром [3].

Использовать фактор времени целесообразно во многих областях деятельности человека. Если режим рабочего дня, учебных занятий, питания, отдыха, занятий физическими упражнениями составлен без учета биологических ритмов, то это может привести не только к снижению умственной или физической работоспособности, но и к развитию какого-либо заболевания.

Биологические ритмы имеют прямое отношение к тренировочной деятельности спортсменов. Им часто приходится выступать в то время суток, когда активность организма человека снижена и в это время без специальной подготовки не будет показан высокий результат. Так, например, летние Олимпийские игры 2016 года будут проходить в Рио-де-Жанейро (Бразилия). Старты во многих видах спорта начнутся в ночное время суток, когда в Беларуси люди спят. Поэтому необходима специальная подготовка к этим условиям. Как это было отмечено выше, желательно начинать переход к новому распорядку заблаговременно за 2 недели до старта и, если позволяют финансовые условия, лучше это делать на месте соревнований. Переход к новым условиям нужно осуществлять постепенно и только через 4–6 дней уже постоянно готовиться в новых соревновательных условиях. В первые дни будет тяжело тренироваться в неблагоприятное время суток, однако затем организм адаптируется и в день соревнований работоспособность будет высокой в нужное время суток. Это поможет достичь более высокого результата.

1. Иорданская, Ф.А. Мониторинг здоровья и функциональная готовность высококвалифицированных спортсменов в процессе учебно-тренировочной работы и соревновательной деятельности / Ф.А. Иорданская, М.С. Юдинцева. – М.: Советский спорт, 2006. – 184 с.

2. Колесов, А.И. Соревновательная деятельность и подготовка спортсменов высшей квалификации в различных природно-географических условиях / А.И. Колесов, Н.А. Ленц, Е.А. Разумовский. – М.: ФиС, 2003. – 292 с.

3. Малахов, Г.П. Биоритмология и уринотерапия / Г.П. Малахов. – СПб.: АО «Комплект», 1995. – 302 с.

СКЕЛЕТНО-МЫШЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ЧЕЛОВЕКА В ANYBODY MODELING SYSTEM

О.А. Новицкий, канд. физ.-мат. наук, доцент,

В.К. Пономаренко, канд. физ.-мат. наук, доцент,

Белорусский государственный университет физической культуры, Республика Беларусь

Опорно-двигательная система человека механически чрезвычайно сложна, и математические модели, описывающие такие системы, должны быть упрощены, оставаясь при этом достаточно эффективными. Как правило, костно-мышечная система предполагается твердотельной, что позволяет применять стандартные методы динамики многих тел. Кроме того, модель должна иметь разумные представления о геометрии мышц и шаблоне комплектации мышц, что является сложным вопросом. Мышцы состоят из мягких тканей и обволакивают друг друга, кости, связки и другие анатомические элементы сложным образом.

Система моделирования Anybody Modeling System (AMS), начало в разработке которой было положено в Ольборгском университете (Дания) авторами [1], является общей системой моделирования для создания и исследования таких скелетно-мышечных моделей. При разработке системы авторами были поставлены и успешно реализованы следующие цели:

– система моделирования должна быть инструментом, позволяющим пользователям строить модели с самого начала или использовать и изменять существующие модели для удовлетворения различных целей;

– система должна облегчить обмен образцами моделей и сотрудничество в этом направлении, что должно позволить тщательно исследовать модели;

– система должна быть способной к обработке моделей тела с реалистичным уровнем сложности, таким, как это показано на рисунке 1 [2].

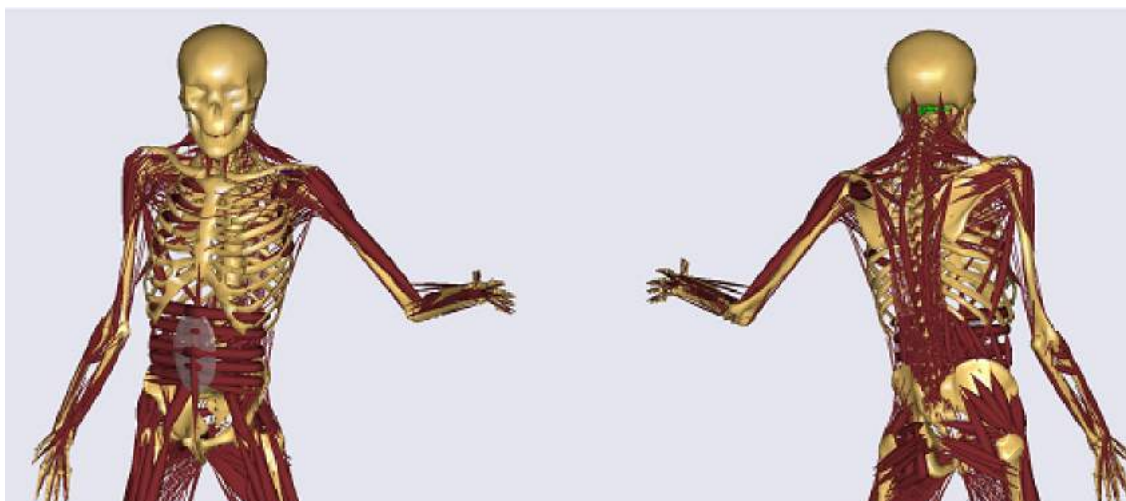


Рисунок 1 – Фрагмент полной модели человеческого тела, созданной в AMS, содержащей несколько сотен мышц,

AMS – это программное решение для моделирования механики живого человеческого тела, взаимодействующего с окружением. Влияние окружения определяется в терминах внешних сил и граничных условий, и пользователь может рассматривать любую позу или локомоцию человеческого тела либо с нуля или из набора записанных данных о движении. После соответствующей симуляции в программной среде AMS вычисляются механические свойства системы «тело-окружение». На рисунке 2 показана модель штангиста, выполняющего жим лежа. В данном случае роль окружения играет механическая модель штанги.

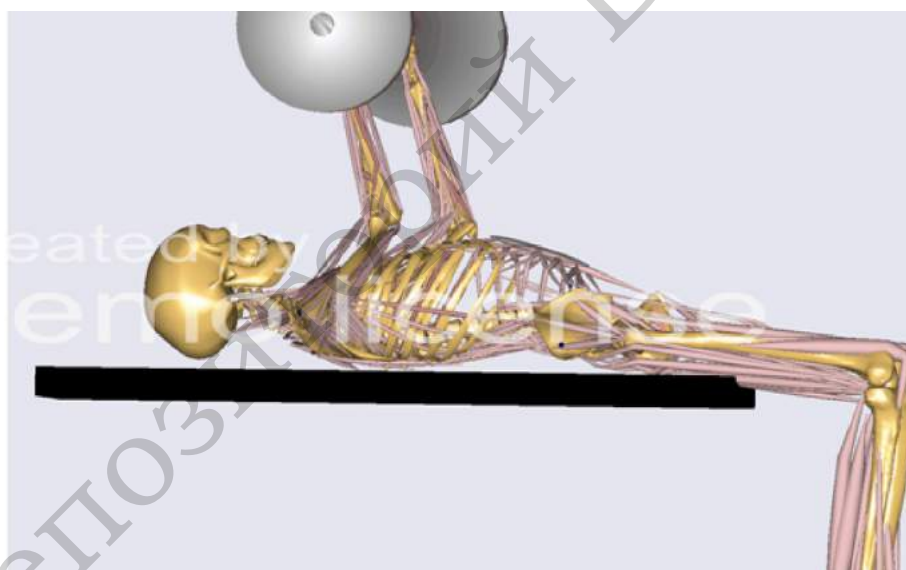


Рисунок 2 – Модель штангиста

От AMS пользователь может получить результаты по отдельным мышечным силам, суставным силам и моментам, упругой энергии в сухожилиях, действия мышц-антагонистов и многое другое.

В AMS можно масштабировать модель, адаптируя ее к лицу с любыми антропометрическими данными.

В AMS предусмотрена возможность импорта данных от систем по захвату движения (в виде файла *.c3d) для управления созданными моделями.

Данные, полученные в AMS, можно экспортировать в мощные программные комплексы, такие как ANSYS, для создания конечно-элементных моделей, что позволяет произвести расчет механических напряжений, возникающих в костных системах и имплантатах.

Одним из центральных действий, выполняемых AMS, является операция «обратная динамика». В биомеханике обратная динамика традиционно понимается как процесс вычисления от сил реакции при анализе походки или другой локомоции до результирующих моментов в анатомических суставах. В контексте AMS «обратная динамика» значит намного больше, чем вышесказанное. «Обратная динамика» позволяет моделировать мышечные и суставные усилия во всем теле участвующему в сложном движении, принимая во внимание

динамические силы инерции, и не обязательно требуя измеренных сил взаимодействия между телом и окружением. «Обратная динамика» имеет то преимущество, что позволяет анализировать очень сложные скелетно-мышечные системы, включающие сотни мускулов, на настольных компьютерах или ноутбуках за несколько секунд. На рисунке 3 показан простой принцип, стоящий за «обратной динамикой».

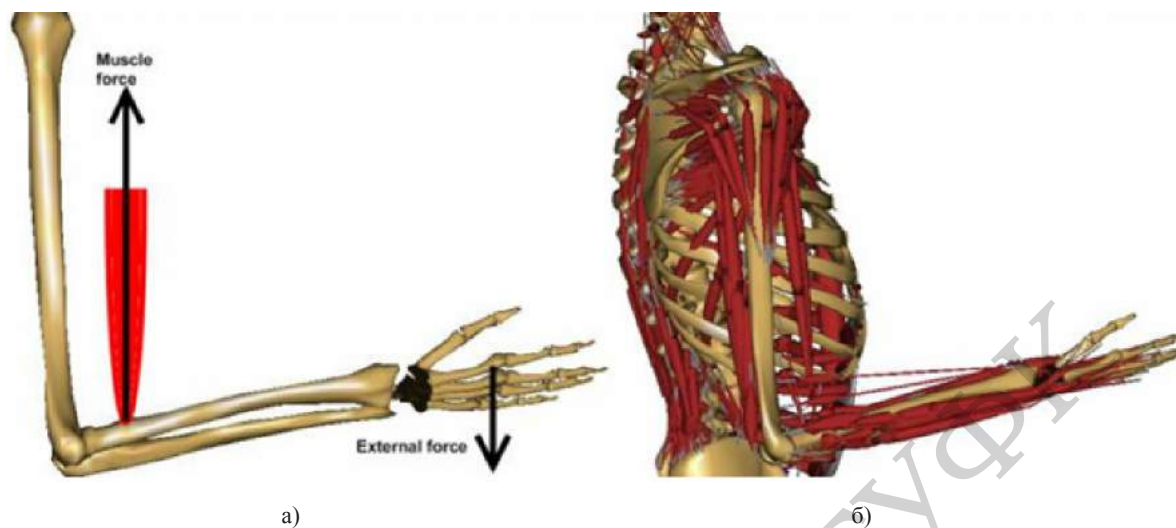


Рисунок 3 – Модель руки, нагруженной внешней силой:
а) идеализированный случай; б) реалистичный случай

Рассматривая идеализированный случай 3(а) [2], по величине внешней силы и длине предплечья, а также положению точки крепления бицепса на предплечье, нетрудно вычислить мышечное усилие в любой момент времени, рассматривая равновесие моментов относительно локтя. Дальнейшие уравнения равновесия могут впоследствии дать нам силы реакции в локтевом суставе. В этом состоит принцип «обратной динамики», что имеет место в AMS.

На том же рисунке 3(б) [2] изображено намного более реалистичное анатомическое представление механики верхней конечности человека. Многократные степени свободы и множество мышц приводят к намного более сложной системе уравнений равновесия, которые должны быть сформированы и решены. Другое осложнение состоит в том, что многие мышцы на своем пути из начальной до конечной точки обволакивают кости. Это значительно усложняет механику проблемы, потому что путь мышцы нелегко предсказать и потому, что мышца действует с некоторой силой на кость, которую она обволакивает. Сгибание руки в локтевом суставе также усложняет задачу, добавляя силы инерции и изменяя уравнения равновесия от одного временного шага до следующего. В итоге мы приходим к тому, что фактически невозможно смоделировать реалистическую скелетно-мышечную систему вручную или даже разработать ее снизу вверх с помощью общего математического программного обеспечения. Единственное жизнеспособное решение состоит в том, чтобы использовать компьютерную систему AMS, разработанную для этой конкретной цели. Есть еще одна сложность, которая не была упомянута: мышечные системы имеют тенденцию иметь большее количество мышц, чем строго необходимо, чтобы уравновесить внешние силы. Понимание этой проблемы и способы ее разрешения в AMS чрезвычайно важны. Для приемлемого понимания физиологических допущений во всей области проблемы необходимого набора мышц приходится использовать дедуктивный подход.

Набор мышц в обратной динамике – процесс определения того, какие мышечные силы уравновешивают данную внешнюю нагрузку. Если мы принимаем введение системы уравнений равновесия для скелетно-мышечной системы вручную, то можно составить их в следующей форме [2]:

$$Cf = r, (1)$$

где f – вектор мышечных и суставных сил, r – вектор, представляющий внешние силы и силы инерции, и C – матрица коэффициентов уравнения. Другими словами, равновесие всегда приводит к линейной системе уравнений, которая должна быть легко решена. К сожалению, это не так, и это происходит по двум причинам.

Первая причина состоит в том, что мышцы – односторонние элементы, которые могут только тянуть, но не толкать. Таким образом, часть f , которая является силами мышц, ограничена в знаке, и только решения с положительными или нулевыми мышечными силами физиологически приемлемы.

Вторая причина – вышеупомянутая мышечная избыточность. Математически это приводит к тому, что уравнения равновесия содержат больше неизвестных, чем количество уравнений и поэтому система обычно имеет бесконечно много решений.

Итак, является ли набор мышц, находящихся в живом человеческом теле, случайным в том смысле, что выбирается первое и лучшее решение, которое уравнивает нагрузку? Эксперименты показывают, что это обстоит не так. В опытных движениях отмечено, что мышцы имеют тенденцию систематически активироваться при выполнении работы, таким образом, есть некоторый критерий выбора мышечной активации центральной нервной системой. Математически мы можем сформулировать выбор между бесконечно многими решениями как проблему оптимизации следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && G(\mathbf{f}^{(M)}) \\
 & \text{Subject to} && \mathbf{Cf} = \mathbf{r} \\
 & && f_i^{(M)} \geq 0, \quad i = 1..n^{(M)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения равновесия в этой проблеме абсолютны: независимо от того, какое решение мы найдем, мы должны уравновесить внешние силы. Требование неотрицательности мышечных сил также добавлено в качестве ограничения к проблеме. Здесь же нужно добавить ограничение, обусловленное предельными прочностными характеристиками мышц. Только те решения, которые удовлетворяют этим требованиям, являются приемлемыми, но из них мы собираемся выбрать то, которое минимизирует целевую функцию G , зависящую от мышечных сил. Это кажется приемлемым, потому что набор мышц, вероятно, является результатом биологической адаптации, и так как работа мышц является энергозатратной для организма, то при ограниченном жизненном ресурсе, она должна быть минимизирована.

Научный поиск общего критерия для мышечного набора непрерывно продолжается, но вряд ли он может быть создан, так как ни один из представленных критериев не основан на детальном знании системы реального управления (центральной нервной системы). Это может показаться слабым звеном AMS. Эту слабость можно сделать менее значимой, используя оптимальный подход в поисках критерия, при котором выполняются такие основные условия, как динамическое равновесие и обеспечение физиологически удовлетворительного результата. Таким образом, это следует рассматривать как разумный подход при тщательном исследовании точности результатов.

По умолчанию в AMS используется полиномиальная целевая функция со степенью $p=3$

$$G(\mathbf{f}^{(M)}) = \sum_{i=1}^{n^{(M)}} \left(\frac{f_i^{(M)}}{N_i} \right)^p \tag{3}$$

где N_i – нормировочные коэффициенты.

Тщательный анализ и экспериментальные данные указывают на то, что применение этой функции в большинстве случаев приводит к значительному синергизму в действии мускулов и физиологической адекватности модели. Предложены и другие, более сложные, формы целевой функции [3].

Моделирование людей и других живых существ является весьма сложной задачей и ни один ученый или даже учреждение не сможет получить значительных результатов, работая изолированно от других исследователей. Опыт многочисленных выполненных исследований за многие годы должен быть объединен. Для этой цели исследовательская группа AnyBody Technology создала библиотеку (репозиторий), где хранятся готовые математические модели частей человеческого тела, прошедшие испытания на физиологическую валидность. Количество моделей ежегодно пополняется, а также вносятся уточнения в готовые модели. Доступ в репозиторий свободен для любого пользователя, располагающего лицензионным продуктом Anybody Modeling System.

AMS располагает достаточно мощным графическим интерфейсом, что позволяет рассмотреть результаты решения в виде графиков, диаграмм, анимационных фрагментов. Знание топографии мышечных усилий при совершении спортивных локомоций дает информацию для тренера, позволяющую акцентировать внимание на развитие определенной группы мышц спортсмена.

1 Damsgaard, Michael. Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System / M. Damsgaard [et al.] // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2006. – P. 1100–1111.

2 The AnyBody™ Modeling, System AnyBody™ Tutorials Version 5.0.1. – May 2011. – P. 229.

3 Siemienski, A. Soft saturation, an idea for load sharing between muscles, Application to the study of human locomotion / A. Siemienski [et al.] // Proceedings of the Symposium “Biocomotion: a century of research using moving pictures”, Promograph, Rome, Italy. – 1992. – P. 293–303.