

Самсонова, А.В. Фазовые портреты мышц /А.В. Самсонова, Н.Б. Кичайкина, И.М. Козлов //Теория и практика физической культуры, 1993.– № 1.– С. 1-3.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

фазовые портреты мышц, метод исследования, циклические локомоции.

Разработанный для решения задач механики [13] метод фазового пространства (фазовой плоскости) стал широко использоваться в радиотехнике и теории автоматического управления [3], а в настоящее время применяется в медицине, физиологии и биомеханике. Так, фазовые портреты используются для выявления вида взаимосвязи между различными признаками ЭКГ человека [1]. На основе сравнительной оценки в фазовом пространстве траекторий обобщенных импульсов и обобщенных координат исследовалось качество протезов бедра и голени человека [8]. Использование метода фазовых портретов и математического моделирования в изучении движений в суставах ног при ходьбе [4,5] позволило проанализировать изоэнергетически дискретное управление движениями со стороны центральной нервной системы. Использование фазовых диаграмм для анализа ходьбы и бега показало, что данный метод может найти широкое применение в системах корректировки движений [17]. На основе ЭВМ создана система анализа обобщенных фазовых портретов в тренажерах с биологической обратной связью [9].

Аппарат фазовых портретов также использовался при изучении механизмов управления мышечной активностью [15,16], однако эти исследования были ограничены лишь качественным анализом управления активностью мотонейронного пула при простейших двигательных задачах. В изучении спортивных движений впервые метод фазового пространства был использован для анализа работы мышц при спринтерском беге [118].

Сущность метода фазового пространства заключается в следующем. Состояние системы определяется положением (координата  $x$ ), скоростью (координата  $x'$ ) и ускорением (координата  $x''$ ). Состояние принято называть фазой. Точка с координатами  $(x, x', x'')$  является геометрическим образом состояния. След движения точки в пространстве называется фазовой траекторией. На практике широко пользуются данным методом при построении траекторий движения точки для двух координат  $(x, x')$ . Тогда задача сводится к рассмотрению плоской кривой на фазовой плоскости (фазового портрета).

## МЕТОДИКА

В экспериментах приняли участие два легкоатлета (мужчина и женщина) и велосипедист. Один из легкоатлетов (№1) – заслуженный мастер спорта, олимпийский чемпион 1988г. в спринтерском беге, другая (№2) — мастер спорта международного класса в барьерном беге. Велосипедист (№3) — заслуженный мастер спорта, олимпийский чемпион 1988 г. в командной гонке преследования. Легкоатлеты выполняли бег (темп 2,1 и 2,0с<sup>-1</sup> соответственно), велосипедист – педалирование на инерционном велостанке в темпе 2,3 с<sup>-1</sup>. В таблице приведены характеристики исследуемых лиц.

Таблица 1

Характеристики участников эксперимента

Характеристики	№1	№2	№3
Возраст, лет	26	18	21
Рост, см	178	176	176
Вес, кг	75	63	70
Длина бедра, см	45,5	42,0	40,5
Длина голени, см	45,5	41,0	40,5

Длина стопы, см	27,5	26,0	28,0
-----------------	------	------	------

При проведении эксперимента регистрировалась электрическая активность двусуставных мышц бедра (прямой мышцы (*RF*) и длинной головки двуглавой мышцы (*BFL*). Одновременно измерялась длительность цикла (при педалировании с помощью электронного отсчетчика, при беге – посредством контактных стелек) и проводилась киносъемка движений с частотой 70 и 64 кадра/с. Все измерения были синхронизированы.

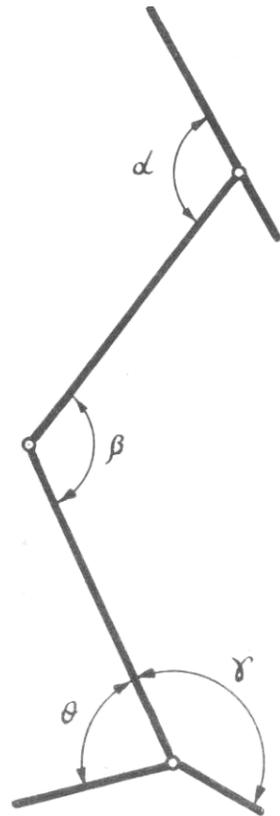


Рис.1. Схема обозначения углов между звеньями нижней конечности

При обработке экспериментальных материалов с киноплёнки снимались координаты маркеров, предварительно наклеенные на анатомические ориентиры тела участников эксперимента. По координатам маркеров рассчитывались межзвенные углы (рис.1), которые сглаживались линейным фильтром [8]. На основе данных о местах прикрепления мышц и межзвенных углов по методике [11,19] рассчитывалась длина исследуемых мышц (*L*). Для определения скорости сокращения мышц (*L'*) применялось численное дифференцирование.

При сопоставлении данных, полученных на различных испытуемых, удобно использовать не абсолютное, а относительное значение длины мышц ( $\Delta L$ ). С этой целью вначале определялась «эквигоническая» длина мышц (*Le*) – длина, при которой сила тяги мышц-антагонистов взаимно уравновешивается [6]. При расчете *Le* межзвенные углы имели следующие значения:  $\alpha = 120$  град;  $\beta = 130$ ;  $\gamma = 90$ ;  $\theta = 150$  град. Относительное удлинение мышц рассчитывалось по формуле:  $\Delta L\% = 100\% (L_i - L_e)/n$ ,

где  $L_i$  – текущее значение длины мышцы,  $p$  – длина бедра. Все расчеты производились на персональном компьютере ДВК-3.

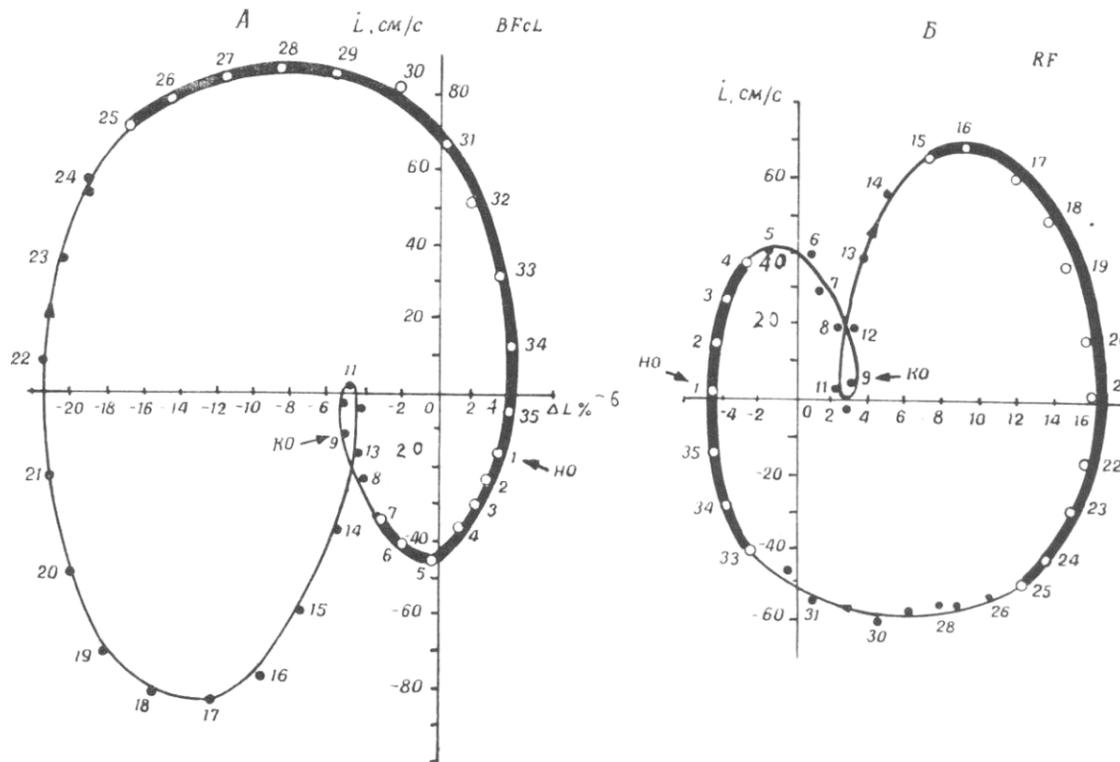


Рис.2. Фазовые портреты двуглавой (А) и прямой (Б) мышц бедра при спринтерском беге (испыт. N2). Обозначения: здесь и на рис.4 – черные кружки (тонкая линия) соответствуют пассивному состоянию мышцы, светлые кружки (жирная линия) – активному. НО – начало опоры; КО – конец опоры. Интервал времени между точками траектории 15 мс, темп движений 2,0 с-1 (4,0 шаг/с)

Фазовые траектории строились в фазовой плоскости  $L'(\Delta L)$ . По осям координат откладывались текущие параметры мышцы: по оси абсцисс – относительное удлинение мышцы ( $\Delta L$ ), по оси ординат – скорость изменения ее длины ( $L'$ ). При этом положительные значения  $L'$  соответствовали эксцентрическому режиму сокращения мышцы (мышца растягивается), а отрицательные – концентрическому режиму (мышца укорачивается). Очевидно, что циклическим движениям соответствуют замкнутые фазовые траектории. По электромиографическим данным на фазовых траекториях отмечались зоны активности мышцы. Цифры на фазовых траекториях обозначают моменты времени в цикле движения и соответствуют определенному пространственному положению звеньев тела.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование фазовых портретов мышц позволяет сопоставить активность мышц-антагонистов при движениях. На рис.2 представлены фазовые портреты прямой мышцы бедра (RF) и длинной головки двуглавой мышцы бедра (BFcL) при выполнении спринтерского бега. Одни и те же цифры соответствуют одному и тому же моменту времени, что позволяет судить о длине, скорости и режиме сокращения мышц. Фазовый портрет двуглавой мышцы бедра свидетельствует о том, что активность этой мышцы возникает задолго до постановки шти на опору (точка 25, рис.2А). Мышца удлиняется (эксцентрический режим) со скоростью 72 см/с. Относительное удлинение мышцы составляет – 16,9%, что свидетельствует о том, что в момент появления электрической активности длина мышцы значительно меньше "экваториальной". Исчезновение электрической активности в двуглавой мышце бедра происходит задолго до окончания опоры (точка 7, рис.2,А), при этом мышца укорачивается со скоростью – 34 см/с, относительное удлинение составляет – 3,4%. Первая активность прямой мышцы бедра (RF) возникает также до постановки ноги на опору (точка 33, рис.2,Б). В этот момент мышца укорачивается со скоростью – 43 см/с, относительное удлинение составляет – 2,2%. Прекращение активности прямой мышцы бедра происходит в тот момент, когда она растягивается со скоростью 27 см/с, относительное удлинение составляет – 3,6% (точка 3, рис. 2Б). В связи с тем, что относительное удлинение пря-

мой мышцы бедра незначительно, можно считать, что в период одновременной активности со своим антагонистом (т.е. двуглавой мышцей бедра) эта мышца работает в квазиизометрическом режиме. Целесообразность одновременной активации мышц-антагонистов нижней конечности некоторые авторы [10,14] видят в создании устойчивой мышечной опоры в момент контакта ноги с дорожкой. Как и у двуглавой мышцы, активность прямой мышцы бедра (точки 15-25) возникает при скорости растяжения 66 см/с, относительное удлинение 7,3%. Расслабление мышцы происходит в момент достижения максимальной скорости укорочения (-51 см/с). Таким образом, сопоставляя работу мышц-антагонистов (или синергистов) по их фазовым портретам, можно получить информацию о длине, скорости и режиме сокращения мышцы, анализировать причины появления и исчезновения ее электрической активности, а также оценить согласование мышечной активности.

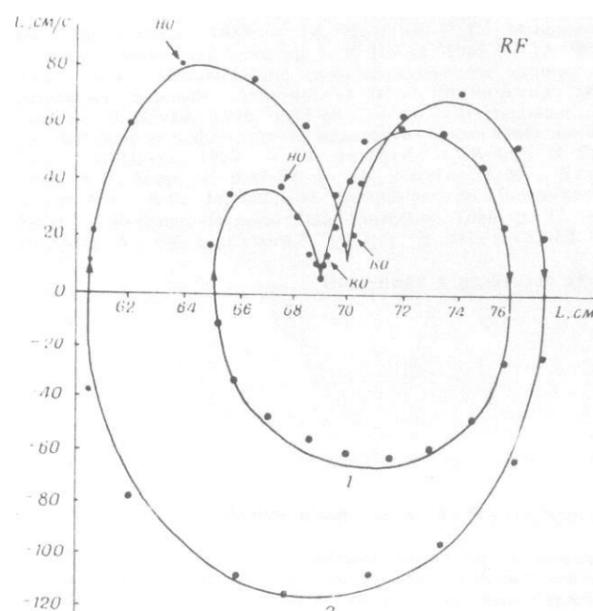


Рис. 3. Фазовые портреты прямой мышцы бедра (*RF*) в начале (кривая 1) и конце (кривая 2) дистанции бега на 400 м. Интервал времени между точками фазовой кривой 25 мс. Кривой 1 соответствуют скорость 8,25 м/с, темп 3,55 шаг/с, длина шага 2,33 м; кривой 2 соответственно 7,38 м/с, 3,43 шаг/с, 2,14 м. Исходные данные взяты из работы Д.В. Незнамова [12].

На основе фазовых портретов мышц возможно введение новых критериев оценки степени утомления той или иной мышцы (группы мышц) в процессе двигательной деятельности. На рис.3 представлены фазовые траектории прямой мышцы бедра при выполнении бега на 400 м (кривая 1 соответствует работе мышцы в начале дистанции, 130-135 м, кривая 2 – в конце дистанции, 375-380 м). Данные об изменении длины мышц в беге на 400 м взяты из работы [12], в которой показано, что при беге на 400 м утомление проявляется как в изменении кинематических параметров бега (скорость, длина и частота шагов), так и в уменьшении скорости сокращения и степени изменения длины двусуставных мышц бедра.

Нами предлагается для оценки степени утомления мышц ввести интегральный показатель, численно равный площади фигуры, очерченной фазовой кривой. Расчеты показывают, что в начале дистанции значение этого показателя для прямой мышцы бедра равно 2466,6 см/с, а в конце дистанции – 992,8 см/с. Значит, площадь фигуры, очерченной фазовой кривой, уменьшилась на 59,8%. Иными словами, в фазе декомпенсированного утомления работа прямой мышцы бедра характеризуется тем, что интегральный показатель уменьшается приблизительно в 2,5 раза. Эта тенденция характерна и для двуглавой мышцы бедра. В то же время работа мышц голени (икроножной мышцы) характеризуется незначительным уменьшением значения данного показателя (с 1768,7 до 1410,9 см/с), т.е. на 21,3%. Таким образом, полученная на основе фазовых портретов информация об изменении интегрального показателя позволяет дифференцированно определить влияние утомления на состояние двигательного аппарата спортсменов.

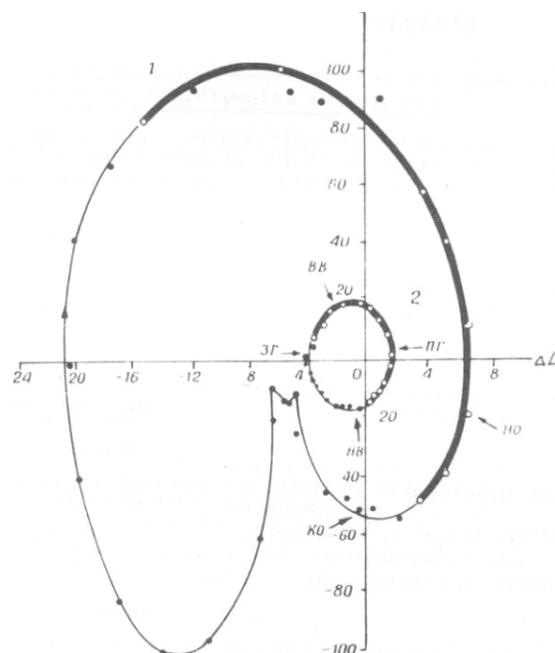


Рис.4. Фазовые портреты двуглавой мышцы бедра (*BFcL*) при спринтерском беге (кривая 1) и педалировании (кривая 2). Интервал времени между точками фазовой кривой 15 мс, темп  $2,1 \text{ с}^{-1}$  (4,2 шаг/с), испыт.№1; (кривая 2), ЗГ — заднее горизонтальное; ВВ — верхнее вертикальное; ПГ — переднее горизонтальное; НВ — нижнее вертикальное положение шатуна. Интервал времени между точками фазовой кривой 14 мс, темп  $2,3 \text{ с}^{-1}$  (испыт.№3).

Фазовые траектории мышц позволяют по-новому подойти к классификации циклических движений. Можно, например, классифицировать движения на основе сопоставления скорости сокращения основных мышц. На рис. 4 представлены фазовые портреты двуглавой мышцы бедра (*BFcL*), отражающие сопряженное изменение длины и скорости сокращения мышцы при спринтерском беге и педалировании (темп движений  $2,1$  и  $2,3 \text{ с}^{-1}$  соответственно). Из рис.4 следует, что при беге скорость сокращения мышцы, как в концентрическом, так и в эксцентрическом режимах превышает этот показатель при педалировании более чем в пять раз. Почти столь же различны и относительные изменения длины мышцы в этих видах локомоций, что подтверждают данные размаха варьирования ( $R$ ) относительного удлинения мышцы. Так, если при беге  $R - 26,5\%$ , то при педалировании  $R - 5,7\%$ . Можно считать, что при одинаковом темпе движений спринтерский бег по скорости сокращения и относительному изменению длины мышц занимает значительно более высокий ранг, чем педалирование. Вызвано это, вероятно, особенностями кинематики в этих видах локомоций.

Сопоставление фазовых диаграмм мышц при выполнении движений спортсменами высшего класса и новичками позволяют выявить новые критерии (модельные характеристики) спортивного мастерства. На основе фазовых портретов мышц возможно создание системы (например, тренажеров), позволяющих посредством сравнения параметров движения испытуемого и модели вносить коррективы непосредственно при выполнении движения и таким образом оптимизировать тренировочный процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод биомеханического анализа на основе фазовых диаграмм мышц дает возможность, во-первых, изучать координацию работы мышц; во-вторых, оценивать степень утомления мышцы (группы мышц) в процессе двигательной деятельности; в-третьих, по-новому подходить к классификации спортивных достижений; в-четвертых, вводить новые критерии технического мастерства; в-пятых, создавать немеханические модели и на их базе – системы

срочной информации. Особенно широкие возможности открываются при использовании данного метода в области изучения управления мышечной активностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.В., Шеповальников А.Н., Шнейдеров В.С. Машинная графика физиологических данных. – М.: Наука, 1981. – 2. Белецкий В.В. Двухногая ходьба. Модельные задачи динамики и управления. – М.: Наука, 1984. – 3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 4. Богданов В.А. "Биофизика", 1985, т.30, вып.5. – 5. Богданов В. А. "Биофизика", 1988, т.33, вы11.1. – 6. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.И. Регуляция позы человека. – М.: Наука, 1965. – 7. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 8. Клочков И.Б. Дис., Л., 1973. – 9. Клочков И. Б., Поветкин Ю.С., Жуков В.А., Соломонов Ю.Ф. Применение ЭВМ для анализа обобщенных фазовых портретов. Тез. докл. 6-ой Всесоюз.конф. "Биомеханика спорта", Чернигов, 1989, С. 88-89. – 10. Козлов И.М. Дис. Л., 1984. – 11. Козлов И.М., Самсонова А.В., Соколов В. Г. "Архив анат., гистол. и эмбриол.", 1988, т.94, №2. – 12. Незнамов Д.В. Дис. Л., 1987. – 13. Павловский М.А., Путята Т.В. Теоретическая механика. – Киев: Вища школа, 1985. – 14. Персон Р. С. Мышцы-антагонисты в движениях человека. – М.: Наука, 1965. – 15. Фельдман А.Г. Механические свойства скелетной мышцы и их регуляция нервной системой. – В кн.: Физиология движений. – Л.: Наука, 1976, с.38-68. – 16. Фельдман А.Г. Центральные и рефлекторные механизмы управления движениями. – М.:Наука, 1979. – 17. Jaworek. "Biology of Sport", 1988, N 5, Suppl. 1, p.47-54. – 18. Kozlov I.M., Samsonova A.V. 6-th International Symposium on Biomechanics in Sport. – Bozeman: Montana State University, 1988, p. 22. – 19. Pedotti A. "Biolog. Cybern.", 1977, V. 2, №1, p. 53-62

Поступила в редакцию 19.11.90