

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ СПОРТСМЕНА

А.Е. Покатилов

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев

THE STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN ATHLETE'S MUSCULAR SYSTEM

A.E. Pokatilov

Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev

Аннотация. В работе рассмотрена новая, выявленная при биомеханическом анализе целенаправленного движения спортсмена, закономерность, связывающая управляющий момент мышечной системы со скоростью его изменения. Показано, что в разных фазах спортивного упражнения эти динамические характеристики достигают экстремальных значений. При этом наблюдаемые экстремумы моментов и их динамических скоростей всегда идут парами, обычно имея временной интервал между собой в доли секунды, редко больше. Анализ характера изменений значений управляющих моментов и их динамических скоростей на экспериментальном и теоретическом уровнях показал: во-первых, наличие такой закономерности в разных видах спорта и в разных упражнениях, например, в спортивной гимнастике и в тяжелой атлетике; во-вторых, представил сложный характер влияния различных силовых факторов на смещение пиков значений управляющего момента и скорости его изменения как сумму таких влияний на общий результат.

Ключевые слова: биомеханический анализ, динамика, динамическая скорость, локомоции, управляющий момент.

Для цитирования: Покатилов, А.Е. Исследование динамических характеристик мышечной системы спортсмена / А.Е. Покатилов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 101–110. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_101

Abstract. The paper considers a new pattern, revealed during the biomechanical analysis of the purposeful movement of an athlete, linking the control moment of the muscular system with the speed of its change. It is shown that in different phases of a sports exercise, these dynamic characteristics reach extreme values. At the same time, the observed extremes of moments and their dynamic velocities always go in pairs, usually having a time interval between them in fractions of a second, rarely more. The analysis of the nature of changes in the values of control moments and their dynamic speeds at the experimental and theoretical levels showed: firstly, the presence of such a pattern in different sports, and in different exercises, for example, in gymnastics and weightlifting; secondly, the analysis presented the complex nature of the influence of various power factors on the displacement of the peaks of the values of the control moment and the speed of its change, as the sum of such influences on the overall result.

Keywords: biomechanical analysis, dynamics, dynamic velocity, locomotion, control moment.

For citation: Pokatilov, A.E. The study of the dynamic characteristics of an athlete's muscular system / A.E. Pokatilov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 1 (50). – P. 101–110. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_101 (in Russian)

Введение

Большую роль играют такие физические качества спортсмена, как сила, скорость и их совместное проявление – мощность [1], [2]. Высокий уровень скоростно-силовых возможностей обеспечивает достижение высоких результатов во многих видах спорта. Для оценки этих качеств спортсмена существуют как специальные тесты, так и специальные силоизмерительные устройства. Используемые методы для такой оценки скоростно-силовых качеств мышечной системы спортсмена основаны на применении изометрического, изотонического, изокинетического и эксцентрического режимов работы. Общим для всех этих методов и применяемых устройств является специальный характер работы мышц спортсмена и направленность на достижение

определенной и достаточно узкой цели. Другими словами, есть спортивные упражнения и есть отдельные тесты и оборудование для развития и оценки этих специальных качеств мышечной системы вне соревновательной программы.

В литературе, например, на примере скоростно-силовой подготовки бегунов-спринтеров, описана структура скоростно-силовых качеств спортсмена:

1. Абсолютная сила.
2. Стартовая сила – способность мышц к быстрому развитию рабочего усилия в начальный момент напряжения.
3. Ускоряющая сила – способность мышц к быстрому наращиванию рабочего усилия в условиях начавшегося их сокращения.
4. Абсолютная быстрота сокращения мышц.

Отмечено, что в случае проявления скоростно-силовых качеств ведущее место занимает градиент силы (прирост силы в единицу времени). Скорость может быть общей и специальной.

Скорость движений, частота и скорость реакции зависят от уровня спортивной техники.

При этом в настоящее время, как в научной литературе, так и на практике, уже существует огромный массив экспериментальных и расчетных данных по кинематике и динамике движения спортсменов, всесторонне описывающих технику различных спортивных упражнений [3]–[5] во всей ее полноте, и не несущих специального и изолированного характера. Но при этом, полностью характеризуя спортивные упражнения, они не используются для решения ряда задач по биомеханике движения в связи с отсутствием соответствующих методик, теорий и осознания проблем и задач биомеханического анализа движения спортсмена. Это же касается и оценки скоростно-силовых свойств его мышечной системы.

Проблема еще состоит и в том, что при биомеханическом анализе не всегда удается тем или иным способом определить именно управляющие силы мышц и их локализацию. Достаточно часто при таком анализе на динамическом уровне удается рассчитать не силы, а моменты управляющих сил мышечной системы. Это требует как соответствующих механико-математических моделей, так и алгоритмов их расчета.

1 Моделирование структуры биомеханической системы и организация натурного и вычислительного эксперимента

Принято биомеханическую систему (БМС) для целей биомеханического анализа моделировать с помощью кинематической цепи. При этом возможны разные варианты такой цепи, зависящие от целей исследования. Цепь может быть плоской или пространственной, она может быть простой или сложной, а также возможно в состав кинематической цепи включать пружины, моделирующие упругие свойства спортивного снаряжения.

На рисунке 1.1, а) представлена модель биомеханической системы, применяемой при биомеханическом анализе большого оборота назад на перекладине с учетом взаимодействия спортсмена со спортивным снарядом. Применяемая модель является 3-х звенником.

На рисунке 1.1 б) показана кинематическая цепь, являющаяся 6-ти звенником и моделирующая спортсмена в тяжелой атлетике при выполнении рывка штанги [6].

Получаемые на основании использования кинематических моделей БМС по рисункам 2.1, а) и б) уравнения сворачивают по одноименным параметрам, получая систему уравнений в рекуррентной, т. е. компактной форме для БМС с произвольным числом степеней свободы.

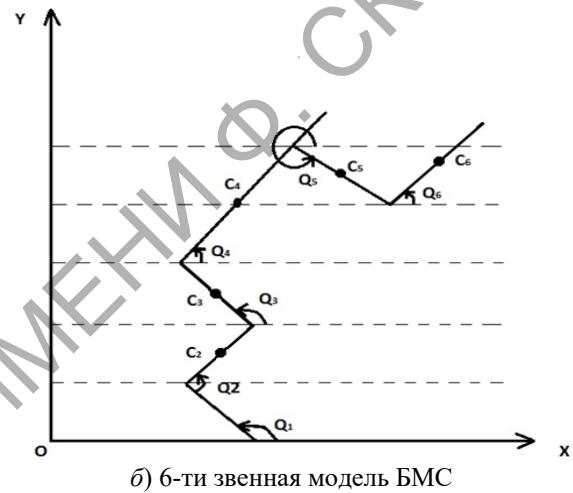
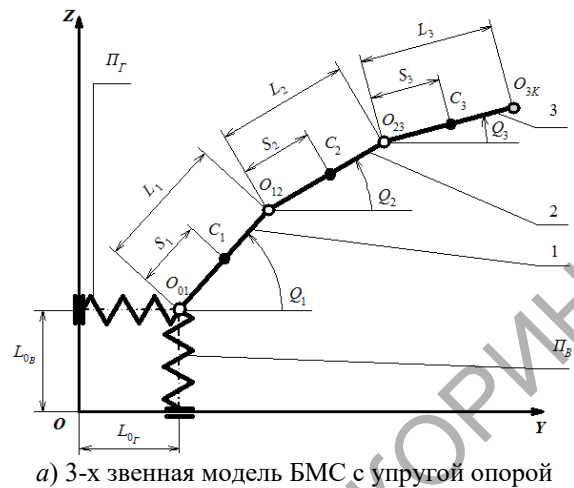


Рисунок 1.1 – Кинематические модели биомеханической системы

На рисунке 1.2 показаны фрагменты видеосъемки натурного эксперимента в тяжелой атлетике при выполнении рывка штанги.



Рисунок 1.2 – Рывок штанги (фрагмент видеосъемки)

2 Динамические уравнения движения спортсмена и его динамическая скорость по управляющему моменту

На основании схемы по рисунку 1.1, а) уравнения для управляющих моментов в общем виде с помощью принципа Даламбера можно записать как

$$M_{i,i-1} = g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j - \ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin Q_j + \ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j). \quad (2.1)$$

Здесь j, k – буквенные индексы. Коэффициенты A_{jk} и C_{ij} отражают геометрию масс тела спортсмена. А параметры $\ddot{L}_{0r}, \ddot{L}_{0b}, Q_j, \dot{Q}_k, \ddot{Q}_k$ – это обобщенные координаты БМС и их производные.

Перепишем управляющий момент мышечных сил относительно шарнира $O_{i-1,i}$ через сумму моментов, зависящих от упругих свойств опоры (спортивного снаряда) и непосредственно биомеханической системы:

$$M_{i,i-1} = M_{i,i-1}^{OP} + M_{i,i-1}^{BMC}. \quad (2.2)$$

Здесь управляющий момент выделенной опоры $M_{i,i-1}^{OP}$ равен

$$M_{i,i-1}^{OP} = -\ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin Q_j + \ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j, \quad (2.3)$$

а управляющий момент выделенной БМС $M_{i,i-1}^{BMC}$ запишем как

$$M_{i,i-1}^{BMC} = g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j). \quad (2.4)$$

Если опора не влияет на локомоции БМС, то динамические уравнения движения принимают вид момента по выражения (2.4) для выделенной БМС

$$M_{i,i-1} = g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j). \quad (2.5)$$

Система уравнений (2.5) подходит для биомеханического анализа локомоций при выполнении рывка штанги в тяжелой атлетике.

Для исследования скоростно-силовых качеств спортсмена введем понятие динамической

скорости по управляющему моменту [7]. В общем виде запишем ее как первую производную управляющего момента по времени

$$V_{M_{i-1,i}} = \frac{dM_{i-1,i}}{dt} \quad (\text{Н}\cdot\text{м}/\text{с}). \quad (2.6)$$

Здесь размерность динамической скорости по уравнению (2.6) имеет размерность мощности, но ею не является.

3 Результаты вычислительного эксперимента

Отметим, что исследуемая закономерность изменения динамической скорости по управляющему моменту обнаружена и по результатам проведения видеосъемки упражнений и вычислительного эксперимента.

Спортивная гимнастика.

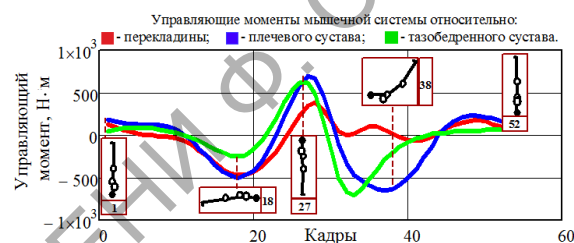


Рисунок 3.1 – Управляющие моменты БМС

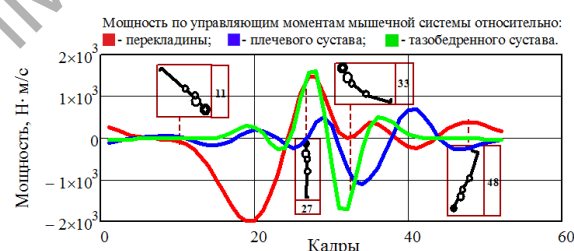


Рисунок 3.2 – Мощность управляющих моментов мышечной системы

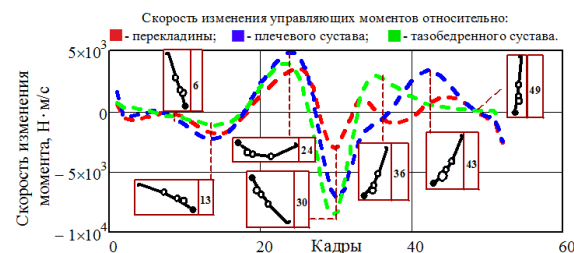


Рисунок 3.3 – Динамическая скорость по управляющему моменту

На рисунках 3.1–3.3 показаны положения тела спортсмена и номера позиций по кинетогамме большого оборота назад на перекладине, соответствующие экстремальным значениям исследуемых характеристик движения.

Сравнительный анализ рисунков 3.1–3.3 показывает: во-первых, различие в значениях мощности и динамической скорости; во-вторых,

несовпадение и по фазам: локальные экстремумы динамической скорости не совпадают ни с графиками мощности по рисунку 3.2, ни с графиками управляющего момента 3.3.

4 Теоретическое исследование динамической скорости по управляющему моменту мышечной системы

Продифференцировав уравнение (2.1) согласно выражению (2.6), получим

$$\begin{aligned}
 V_{M_{i,i-1}} = \frac{dM_{i,i-1}}{dt} = & -\ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin Q_j - \\
 & -\ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \cos Q_j + \ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j - \\
 & -\ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \sin Q_j - g \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \sin Q_j + \\
 & + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \\
 & - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \sin(Q_k - Q_j) - \\
 & - 2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k \ddot{Q}_k \sin(Q_k - Q_j) - \\
 & - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \cos(Q_k - Q_j). \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Уравнение (4.1) имеет 9 слагаемых, отражающих влияние того или иного силового фактора на динамическую скорость управляющего момента. С целью удобства, выражение (4.1) сгруппировано по примеру уравнения (2.2) таким образом, чтобы сразу отделить часть, зависящую от деформации опоры, и часть, зависящую от движения только БМС.

Введем следующие обозначения слагаемых формулы (4.1)

$$V_{M_{i,i-1}}^{(1)} = -\ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin Q_j, \quad (4.2)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(2)} = -\ddot{L}_{0r} \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \cos Q_j, \quad (4.3)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(3)} = \ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j, \quad (4.4)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(4)} = -\ddot{L}_{0b} \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \sin Q_j, \quad (4.5)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(5)} = -g \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \sin Q_j, \quad (4.6)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(6)} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j), \quad (4.7)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(7)} = -\sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \sin(Q_k - Q_j), \quad (4.8)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(8)} = -2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k \ddot{Q}_k \sin(Q_k - Q_j), \quad (4.9)$$

$$V_{M_{i,i-1}}^{(9)} = -\sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \cos(Q_k - Q_j). \quad (4.10)$$

Ввиду уравнений (4.2)–(4.10) динамическая скорость принимает вид

$$V_{M_{i,i-1}} = \sum_{s=1}^9 V_{M_{i,i-1}}^{(s)}. \quad (4.11)$$

Здесь выражения (4.2)–(4.5) отражают влияние динамической деформации спортивного снаряда на динамическую скорость, а выражения (4.6)–(4.10) – влияние непосредственно самой БМС. С учетом этого уравнение (4.11) можно разбить на две части: на часть, зависящую от деформации опоры (спортивного снаряда), и часть, зависящую только от движения спортсмена. Имеем

$$V_{M_{i,i-1}} = \sum_{s=1}^4 V_{M_{i,i-1}}^{(s)} + \sum_{s=5}^9 V_{M_{i,i-1}}^{(s)} = V_{M_{i,i-1}}^{OP} + V_{M_{i,i-1}}^{BMC}. \quad (4.12)$$

Отметим, что выражение (4.12) подходит для упражнений, выполняемых на упругой опоре, например, для упражнений на перекладине в спортивной гимнастике. Вторая часть выражения (4.12) $V_{M_{i,i-1}}^{BMC}$, зависящая от движения только спортсмена, подходит для исследования рывка штанги в тяжелой атлетике:

$$\begin{aligned}
 V_{M_{i,i-1}} = & -g \sum_{j=i}^N C_{ij} \dot{Q}_j \sin Q_j + \\
 & + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \\
 & - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \sin(Q_k - Q_j) - \\
 & - 2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k \ddot{Q}_k \sin(Q_k - Q_j) - \\
 & - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 (\dot{Q}_k - \dot{Q}_j) \cos(Q_k - Q_j). \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

Тогда полная динамическая скорость по управляющему моменту через формулы (4.6)–(4.10) принимает вид

$$V_{M_{i,i-1}} = \sum_{s=5}^9 V_{M_{i,i-1}}^{(s)}. \quad (4.14)$$

Здесь суммирование начинается со скорости $V_{M_{i,i-1}}^{(5)}$, отражающей действие сил тяжести.

5 Анализ и обсуждение закономерности изменения динамической скорости по управляющему моменту

Выполним биомеханический анализ динамики целенаправленного движения спортсмена по результатам натурного и вычислительного экспериментов для упражнений спортивной гимнастики и тяжелой атлетики.

Общим замечанием будет упоминание того факта, что с точки зрения математики сдвиг локальных экстремумов динамической скорости по управляющему моменту и самого момента

обусловлен как наличием функций \sin и \cos в уравнении моментов (2.1), так и их взаимном преобразовании при дифференцировании по формулам (4.2)–(4.10), так как синусоида и косинусоида сдвинуты по отношению друг к другу вдоль оси абсцисс. Но это не раскрывает биомеханических причин такой взаимосвязи моментов и их динамических скоростей: математика отражает лишь функциональную связь, но не показывает механизмы зависимости, т. е. каким образом и какими ресурсами мышечная система спортсмена обеспечивает это явление, и какие силовые факторы в первую очередь влияют на смещение локального экстремума скорости относительно экстремума момента, то есть их несовпадение во времени.

На основании формул (2.1) и (4.2)–(4.10) запишем в таблице 5.1 в упрощенной форме уравнения для управляющих моментов и их производных по времени, то есть динамических скоростей. Так как за смещение локальных экстремумов отвечают тригонометрические функции, а множители при них лишь изменяют значение функций по ординате, то несущественные параметры в формулах обозначим через коэффициенты A_i и B_j . Смещение локальных экстремумов

(отставание или опережение функций моментов и их скоростей) происходит в случае изменения $\cos Q_j$ на $\sin Q_j$ или наоборот. Таким образом, сравнение уравнений и скоростей по таблице 5.1 показывает, что в случае большого оборота назад на перекладине сдвиг функций происходит для пяти слагаемых формулы (4.1), а для четырех слагаемых этой же формулы таких изменений нет.

Для упражнений в тяжелой атлетике деформация опоры не учитывается, то есть п. 1 и п. 2 отбрасывается, а исследуются только п. 3–п. 5. В этом случае 2 члена формулы (4.13) не смещаются, а 3 имеют такое смещение из-за изменения тригонометрических функций. Эти варианты представлены в таблице 5.2.

Отметим важный момент: исследование перехода отдельных тригонометрических функций не дает полной картины явления смещения моментов и их изменений во времени. Предварительный анализ формул из системы уравнений (4.2)–(4.10) показывает, что даже в тех выражениях, где тригонометрические формулы не изменяются, сами выражения являются суммами функций $\sin Q_j$ или $\cos Q_j$, что тоже должно давать смещение локальных экстремумов.

Таблица 5.1 – Смещение локальных экстремумов моментов и скоростей относительно друг друга с учетом деформации опоры

№	Силовые факторы	Уравнения		Сдвиг единичных функций
		моментов	скоростей	
1	Момент сил инерции от горизонтальной деформации перекладины	$M_1 = -A_1 \sin Q_j$	$V_1 = -B_1 \sin Q_j$	Нет
			$V_2 = -B_2 \cos Q_j$	Есть
2	Момент сил инерции от вертикальной деформации перекладины	$M_2 = A_2 \cos Q_j$	$V_3 = B_3 \cos Q_j$	Нет
			$V_4 = -B_4 \sin Q_j$	Есть
3	Момент от сил тяжести звеньев БМС	$M_3 = A_3 \cos Q_j$	$V_5 = -B_5 \sin Q_j$	Есть
4	Момент от нормальных сил инерции звеньев БМС	$M_4 = A_4 \cos(Q_k - Q_j)$	$V_6 = B_6 \cos(Q_k - Q_j)$	Нет
			$V_7 = -B_7 \sin(Q_k - Q_j)$	Есть
5	Момент от касательных сил инерции звеньев БМС	$M_5 = -A_5 \sin(Q_k - Q_j)$	$V_8 = -B_8 \sin(Q_k - Q_j)$	Нет
			$V_9 = -B_9 \cos(Q_k - Q_j)$	Есть

Таблица 5.2 – Смещение локальных экстремумов моментов и скоростей относительно друг друга в условиях жесткой опоры

№	Силовые факторы	Уравнения		Сдвиг функций
		моментов	скоростей	
1	Момент от сил тяжести звеньев БМС	$M_6 = A_6 \cos Q_j$	$V_{10} = -B_{10} \sin Q_j$	Есть
2	Момент от нормальных сил инерции звеньев БМС	$M_7 = A_7 \cos(Q_k - Q_j)$	$V_{11} = B_{11} \cos(Q_k - Q_j)$	Нет
			$V_{12} = -B_{12} \sin(Q_k - Q_j)$	Есть
3	Момент от касательных сил инерции звеньев БМС	$M_8 = -A_8 \sin(Q_k - Q_j)$	$V_{13} = -B_{14} \sin(Q_k - Q_j)$	Нет
			$V_{14} = -B_{14} \cos(Q_k - Q_j)$	Есть

Причины несовпадения во времени пика динамической скорости и пика мышечных усилий необходимо искать в биомеханическом анализе целенаправленного движения, выполняемого на основании как экспериментального материала, включая вычислительный эксперимент, так и на основании теоретических знаний из спортивной педагогики и физиологии.

Спортивная гимнастика. Проанализируем результаты вычислительного эксперимента для большого оборота назад на перекладине, исходя из структур механико-математических моделей по уравнениям (2.1) для управляющего момента [9]–[11] и из уравнений (4.2)–(4.10) для динамических скоростей по этому же моменту. Для управляющего момента относительно плечевого сустава имеем по рисункам 5.1, а) и б) и формулам (4.2) и (4.3) графики соотношения управляющих моментов и составляющих динамической скорости, зависящих от деформации спортивного снаряда в горизонтальном положении.

На данных рисунках 5.1, а) и б) и всех последующих график 1 обозначает управляющий момент по соответствующему силовому фактору, а график 2 – динамическую скорость его изменения.

На рисунках 5.2 а) и б) представлены графики изменения динамических параметров по

уравнениям (2.1) и (4.4) и (4.5) в вертикальном направлении при деформации опоры.

На рисунке 5.3 показано соотношение графиков управляющего момента, возникающего от действия сил тяжести, и динамической скорости этого силового фактора.

Как и на предыдущих рисунках здесь четко прослеживается относительный сдвиг локальных экстремумов скорости и управляющего момента.

На рисунках 5.4, а) и б) показано соотношение управляющих моментов по инерционной нагрузке от нормальных ускорений и их изменений во времени (скорости).

На рисунках 5.5, а) и б) представлены графики управляющего момента в части инерционной нагрузки по касательным ускорениям и динамических скоростей по данному фактору в соответствии с уравнениями (4.9) и (4.10).

Анализ рисунков 5.1–5.5 показывает наличие несовпадения пиков скоростей и пиков моментов во всех случаях.

Смещение происходит независимо от взаимного перехода тригонометрических функций. Предположительно здесь сказывается суммарный эффект одноименных тригонометрических функций, отражающий сложную модель БМС со многими степенями свободы.

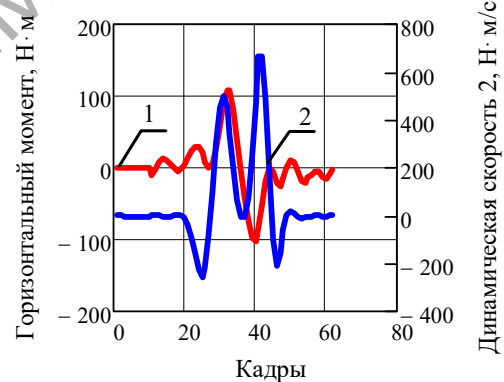
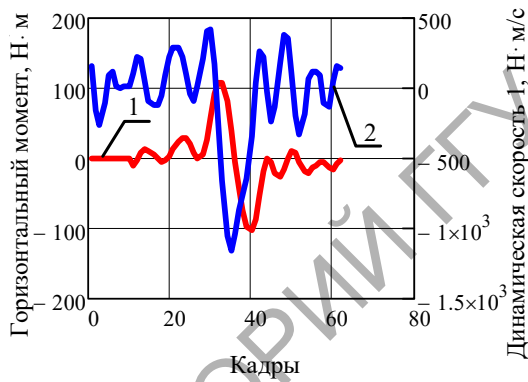


Рисунок 5.1 – Динамическая нагрузка от горизонтальной пружины

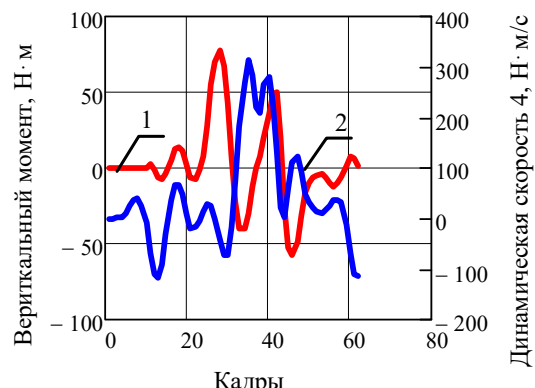
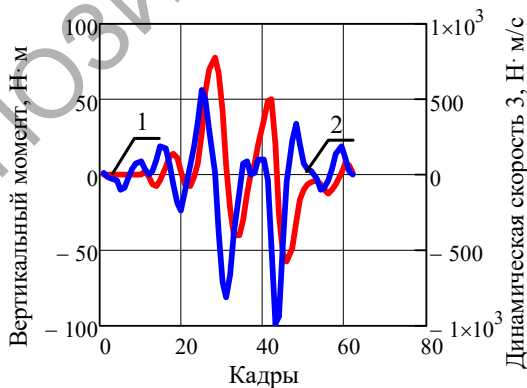


Рисунок 5.2 – Динамическая нагрузка от вертикальной пружины

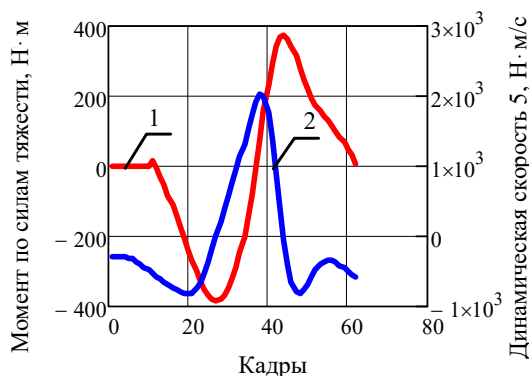


Рисунок 5.3 – Динамическая нагрузка от силы тяжести

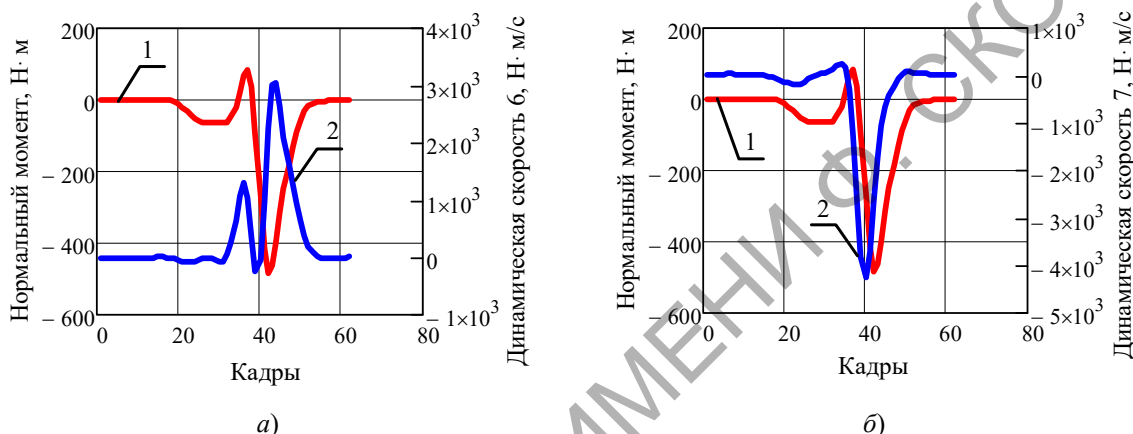


Рисунок 5.4 – Динамическая нагрузка от нормальных сил инерции

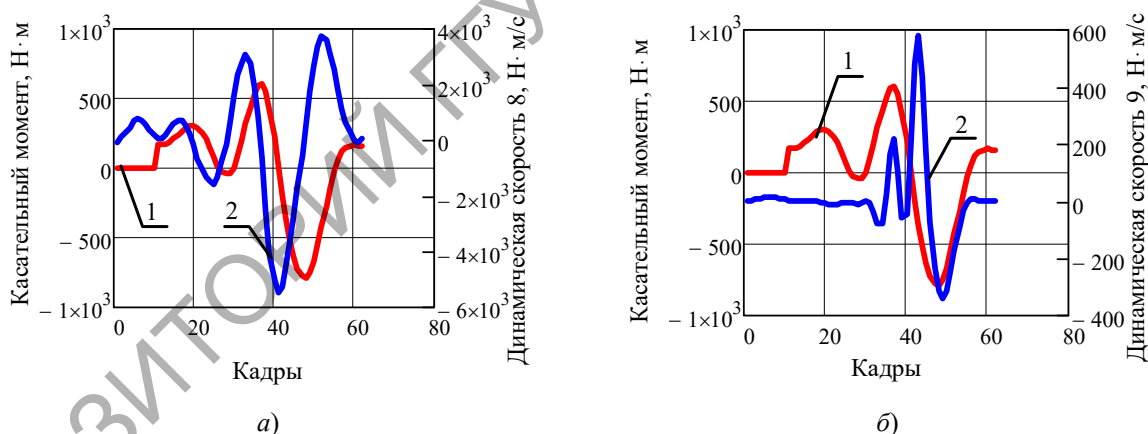


Рисунок 5.5 – Динамическая нагрузка от касательных сил инерции

Тяжелая атлетика. Для экспериментов в тяжелой атлетике принята модель БМС по рисунку 1.1, б).

Рассмотрим изменение управляющего момента относительно локтевого сустава при выполнении рывка штанги весом 140 кг. На рисунке 5.6 представлены изменения управляющего момента по силам тяжести и его динамическая скорость.

Отметим смещение локальных экстремумов обеих функций за все время видеосъемки.

Согласно таблицы 5.2 по п. 1 имеется переход функций: $\cos Q_j$ в $-\sin Q_j$.

На рисунках 5.7 а) и б) представлены изменения динамических скоростей по уравнениям (4.7) и (4.8) для управляющего момента по нормальным силам инерции. Отметим два неожиданных факта: во-первых, на обоих графиках есть несовпадение локальных экстремумов; во-вторых, графики для обеих частей уравнения по скоростям выглядят одинаково.

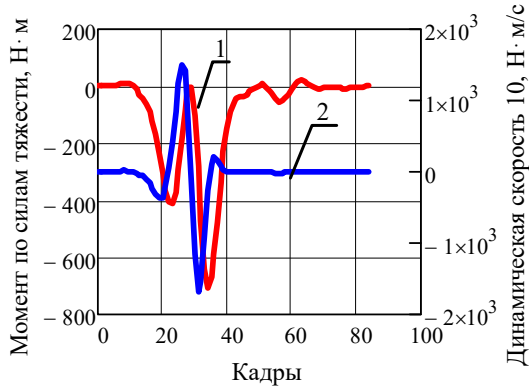


Рисунок 5.6 – Динамическая нагрузка от силы тяжести

Для прояснения последнего момента приведем графики по управляющему моменту и его динамической скорости в части нормальных сил инерции для коленного сустава в том же упражнении: рывке штанги весом 140 кг. Эти графики показаны на рисунках 5.8, а) и б).

Анализ рисунков 5.8, а) и б) на примере управляющего момента относительно коленного сустава спортсмена показывает различие графиков динамических скоростей по формулам (4.7) и (4.8). Это означает, что для локтевого сустава по рисункам 5.7, а) и б) графики тоже верны.

На рисунках 5.9, а) и б) показано соотношение управляющего момента и динамических скоростей в части, зависящей от касательных сил инерции.

Анализ всех зависимостей по рисункам 5.7–5.10 позволяет сделать вывод, что сдвиг пиков усилий и их динамических скоростей наблюдается по всем силовым факторам независимо от взаимного перехода тригонометрических функций при дифференцировании.

Полный управляющий момент и его динамическая скорость по уравнению (4.14) для рывка штанги 140 кг показана на рисунке 5.10. Общая сумма составляющих динамической скорости по выражениям (4.6)–(4.10) и уравнению (4.14) приводит к сдвигу пиков динамической скорости и управляющего момента в каждом суставе спортсмена.

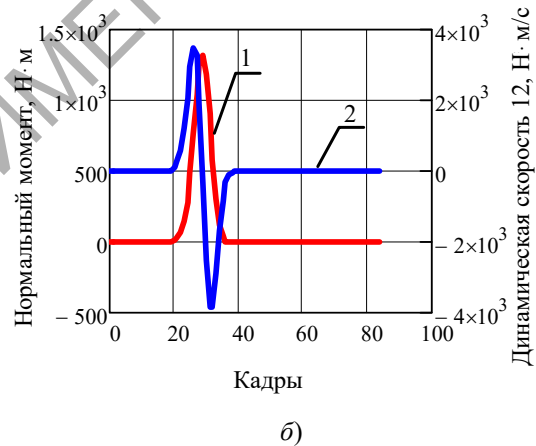
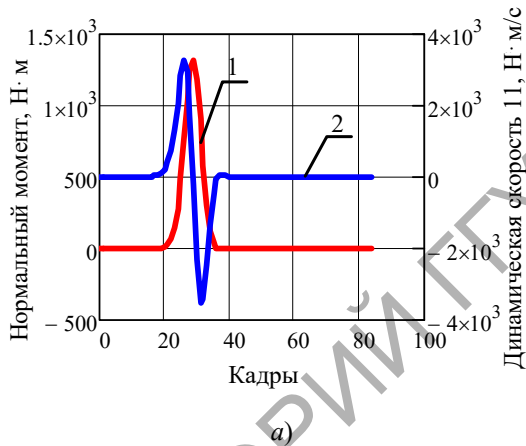


Рисунок 5.7 – Динамическая нагрузка от нормальных сил инерции

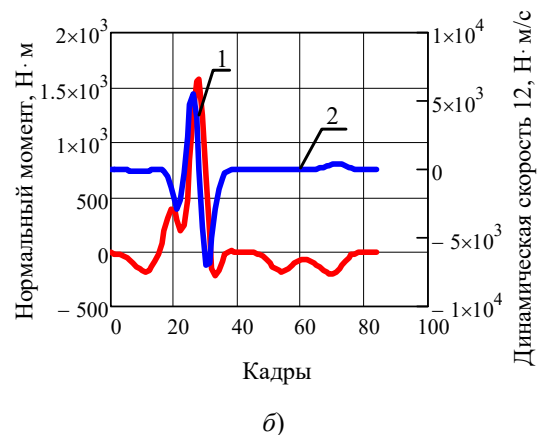
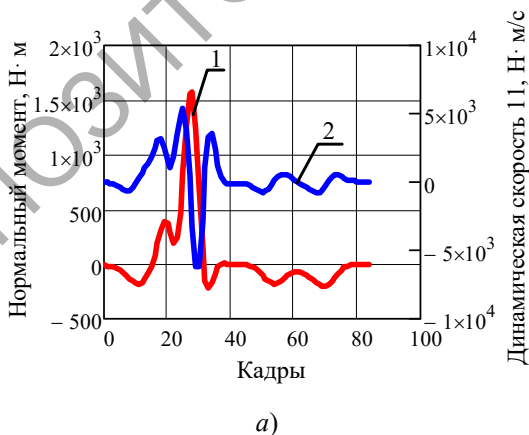
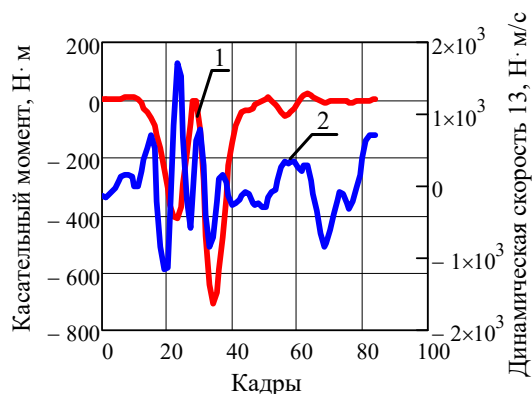
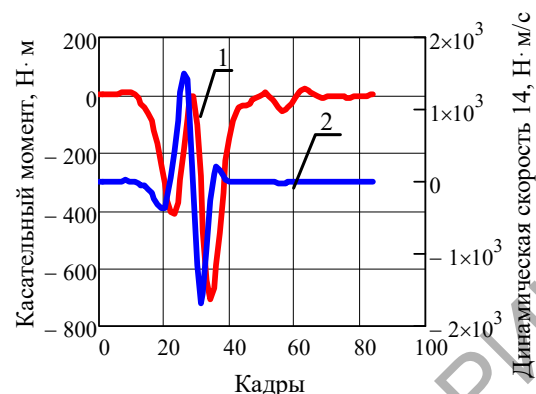


Рисунок 5.8 – Динамическая нагрузка от нормальных сил инерции



а)



б)

Рисунок 5.9 – Динамическая нагрузка от касательных сил инерции

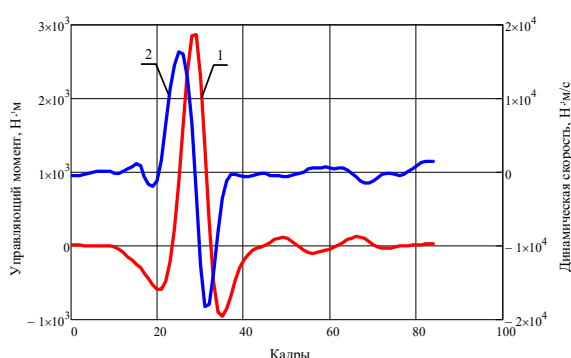


Рисунок 5.10 – Сдвиг динамической скорости по отношению к управляющему моменту для локтевого сустава

Заключение

Огромный массив существующих данных по кинематике и динамике локомоций спортсмена [4], [5], [12] позволяет выполнить оценку скоростно-силовых качеств мышечной системы. В этом случае нет необходимости использования специальных тренажеров и соответствующих методик проведения измерений. Исследования выполняются параллельно с решением обычных задач биомеханического анализа по динамике спортивных упражнений и с использованием аппарата математического анализа через дифференцирование динамических характеристик целенаправленного движения биомеханической системы. Для этого введено понятие динамической скорости управляющего момента мышечной системы. При этом возможны несколько путей исследования скоростно-силовых закономерностей движения: с использованием дифференцирования экспериментальных данных во времени, полученных по результатам видеосъемки и последующего вычислительного эксперимента в области динамики движения; с использованием для динамического анализа на теоретическом уровне специальных механико-математических моделей.

Проведенный анализ целенаправленного движения спортсмена выявил новую, ранее неизвестную закономерность в динамике локомоций. Вычислительный эксперимент в области спортивной гимнастики и тяжелой атлетики показал, что в различных упражнениях, и в различных видах спорта происходит относительный сдвиг пиков значений динамических скоростей и управляющих моментов мышечной системы. При этом такие пики моментов и их скоростей всегда идут парами и в определенной последовательности. Это означает, что в определенные фазы упражнений управляющие моменты достигают своих экстремальных значений, с небольшой разбегом во времени своего экстремума достигают и скорости изменения этих моментов. Промежутки времени между пиковыми значениями силовых и скоростно-силовых характеристик составляют доли секунды и обычно соответствуют нескольким кадрам видеосъемки.

Исследованиями выявлен и поставлен вопрос о причинах такого сдвига в изучаемых характеристиках движения, и о том, что первично: достижение максимальных усилий, начало их спада и в этот момент достижение максимальной динамической скорости, или же наоборот – пик скорости опережает пик усилий в каждой исследуемой фазе спортивного упражнения. Все это требует дальнейших и более глубоких исследований динамики целенаправленного движения спортсмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бомпа, Т. Периодизация спортивной тренировки / Т. Бомпа, К. Буццичелли. – Москва: Спорт, 2016. – 384 с.
2. Рябинин, С.П. Скоростно-силовая подготовка в спортивных единоборствах / С.П. Рябинин, А.П. Шумилин. – Красноярск: Институт естественных и гуманитарных наук СФУ, 2007. – 153 с.
3. Бегун, П.И. Моделирование в биомеханике: учеб. пособие / П.И. Бегун, П.Н. Афонин. – Москва: Высш. шк., 2004. – 390 с.

4. *Воронович, Ю.В.* Биомеханика тяжелоатлетических упражнений: монография / Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук, В.И. Загrevский; М-во внутр. дел Респ. Беларусь, учреждение образования «Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь». – Могилев: Могилев. институт МВД, 2015. – 196 с.

5. *Загrevский, В.И.* Биомеханика физических упражнений: учебное пособие / В.И. Загrevский. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2003. – 140 с.

6. *Воронович, Ю.В.* Методика организации промера тяжелоатлетических упражнений по материалам видеосъемки / Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук // Ученые записки: сб. науч. тр. – Белорус. гос. ун-т физ. культуры; редкол.: М.Е. Кобринский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – Вып. 14. – С. 142–151.

7. *К вопросу оценки скоростно-силовых качеств мышечной системы спортсмена* / А.Е. Покатилов, М.А. Киркор, Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук // Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте: материалы VII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, 21–22 ноября 2019 г., Москва. – Рос. гос. акад. физ. культуры, спорта и туризма, Моск. гос. акад. физ. культуры; ред.-сост. А.Н. Фураев. – Москва: Малаховка, 2019. – С. 108–112.

8. *Покатилов, А.Е.* Проблемы исследования механики движения опорно-двигательного аппарата человека / А.Е. Покатилов, М.А. Киркор //

Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 59–67.

9. *Гавердовский, Ю.К.* Техника гимнастических упражнений. Популярное учебное пособие / Ю.К. Гавердовский. – Москва: Terra-Спорт, 2002. – 512 с.

10. *Киркор, М.А.* Математические модели движения в биомеханике спорта / М.А. Киркор, А.Е. Покатилов, А.М. Гальмак // Научные и методические аспекты математической подготовки в университетах технического профиля: материалы Междунар. науч. пр. конф., 25 октября 2019 г., Гомель. – Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта». – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 18–21.

11. *Смолевский, В.М.* Спортивная гимнастика / В.М. Смолевский. – Киев: Олимпийская литература, 1999. – 194 с.

12. *Попов, Г.И.* Биомеханика двигательной деятельности: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / Г.И. Попов, А.В. Самсонова. – Москва: ИЦ Академия, 2013. – 320 с.

Поступила в редакцию 08.07.2021.

Информация об авторах

Покатилов Алексей Евгеньевич – старший преподаватель