

УДК 796+612.741.1+519.237

Хохолко А.А., Михута И.Ю.

ФАКТОРНАЯ СТРУКТУРА МЕЖМЫШЕЧНОЙ КООРДИНАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ СО СЛОЖНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

В статье представлены факторная структура межмышечной координации при выполнении тестовых заданий со сложной двигательной структурой и алгоритм анализа данных электромиографии высококвалифицированных спортсменов, характеризующих компоненты координационных способностей. Для оценки межмышечной координации были использованы тестовые задания на согласованность движений, представляющие собой комплексы упражнений для нижних и верхних конечностей. Алгоритм электромиографической оценки качества выполнения двигательных действий спортсменами состоит из расчета коэффициентов координации, отражающих уровень развития компонентов координационных способностей, и анализа средних ранговых значений. Для выявления факторов, влияющих на качество выполнения тестовых заданий со сложной двигательной структурой, выполнен корреляционный и факторный анализ. Определена корреляционная взаимосвязь между коэффициентами координации и выявлены факторы, влияющие на эффективность выполнения упражнений. Разработанный алгоритм позволяет комплексно оценивать отдельные компоненты координационных способностей в тестах, определяющих эффективность управляющих движений спортсменов в стандартизированных заданиях со сложной двигательной структурой.

Ключевые слова: беспроводная электромиография, координационные способности, комплексная оценка, корреляционный и факторный анализ.

Постановка проблемы. Анализ последних источников и публикаций. В современном спорте применяют различные технологии для определения значений параметров двигательных действий спортсменов. Функциональное состояние спортсмена (физиологическое и психическое) служит основным критерием для характеристики его возможностей и находится в прямой зависимости от уровня развития кондиционных (силовых, скоростных, выносливости, гибкости) и координационных способностей.

В связи с этим важнейшей представляется задача объективной оценки подготовленности спортсмена. Труднее всего поддаются оценке движения со сложной двигательной структурой, выполнение которых требует проявления высокого уровня развития координационных способностей.

Опорно-двигательный аппарат включает в себя большое количество звеньев, обладающих суммарно более чем сотней степеней свободы. Именно поэтому управление данной системой является процессом весьма сложным. По мнению создателя современной биомеханики Н. А. Бернштейна, координация движений состоит в преодолении степеней свободы органов движения, т. е. в превращении их в управляемые системы, которое реализуется посредством деятельности скелетных мышц [1].

Нервно-мышечная координация выступает в качестве системообразующего фактора по отношению к активным усилиям и движениям человека. Ее функция выражается в упорядочении мышечных сокращений (активности отдельных мышц) таким образом, чтобы совершаемое движение точно следовало надлежащей траектории для достижения конкретной цели [2]. Оптимальный результат возможен только тогда, когда работа отдельных мышечных групп будет скоординирована в пространственно-временных и динамико-временных отношениях. Такое взаимодействие участвующих в движениях мышц называется межмышечной координацией [3].

С развитием технологий и измерительной техники появилась возможность оценки двигательных действий с использованием метода электромиографии. За последние десятилетия при помощи данного метода было проведено большое количество исследований в области изучения техники движений в различных видах спорта, в том числе – в области изучения координационных способностей.

Применение современных беспроводных компьютеризированных электромиографических методик, позволяет исследовать параметры необходимых показателей межмышечной координации для оценки степени и характера согласованности и соразмерности вовлечения мышц в последовательность выполнения контролируемого двигательного действия. При этом спортсмен может выполнять различные упражнения без каких-либо ограничений, в обстановке, максимально приближенной к реальной [4]

Результатом применения этого метода при исследовании даже самых кратковременных двигательных действий является большой массив данных. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема статистической обработки и интерпретации этого массива, который является избыточным для тренера и/или спортсмена и не может быть сразу использован для определения качества движений.

Цель работы – выявление факторов, влияющих на качество выполнения двигательных действий со сложной двигательной структурой.

Задачи: 1. Рассчитать коэффициенты, характеризующие компоненты координационных способностей спортсменов. 2. Определить корреляционные связи между коэффициентами. 3. Выявить факторы, влияющие на качество выполнения двигательных действий со сложной двигательной структурой.

Результаты исследования. Для определения возможности использования метода электромиографии в оценке отдельных координационных способностей были проведены пилотные исследования с участием 32 квалифицированных спортсменов, позволившие выявить закономерности динамики биоэлектрической активности мышц при выполнении тестовых заданий различной координационной сложности.

Для оценки межмышечной координации были использованы тестовые задания на согласованность движений, представляющие собой комплексы упражнений для нижних и верхних конечностей, которые проводились в следующей последовательности: тест 1 – с открытыми глазами (Т1), тест 2 – с закрытыми глазами (Т2), тест 3 – с открытыми глазами на повышенной и ограниченной по площади опоре – на тумбе (Т3) [4].

Для оценки используемых тестовых заданий разработан алгоритм и коэффициенты, часть из которых заимствованы из литературы [4, 5], часть – разработаны по аналогии. Алгоритм сравнительного анализа показателей амплитуды электромиографического сигнала заключается в следующем:

1. При сравнении амплитуды сигналов в паре "агонист-антагонист" на примере прямой и двуглавой мышц бедра правой конечности было выявлено, что при резком увеличении амплитуды активности прямой мышцы бедра наблюдается снижение амплитуды двуглавой мышцы бедра и наоборот.

Для оценки взаимодействия мышц-антагонистов введем коэффициент реципрокности КР – коэффициент, который рассчитывается для мышцы, находящейся в режиме антагонистического напряжения, и показывает степень ее активации в процентах по отношению к величине активности мышцы-агониста (формула 1) [5]:

$$КР = \frac{A_{ант}}{A_{агон}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $A_{ант}$ и $A_{агон}$ – амплитуды ЭМГ антагониста и агониста соответственно в режиме напряжения агониста.

Коэффициент реципрокности в норме при клиническом исследовании мышц в режиме максимального произвольного напряжения не должен превышать 15–20 %. В разгибателях он выше, чем в сгибателях, как рук, так и ног [5]. Учитывая, что в спортивных движениях может наблюдаться одновременная активность мышц-антагонистов, коэффициент реципрокности в данном случае может достигать достаточно высоких значений.

Коэффициент реципрокности показывает, насколько включается в работу мышца-антагонист, которая в данный момент не должна быть напряжена.

2. При сравнении идентичных двигательных действий нижних конечностей в задании Т1 на примере правой и левой прямых мышц бедра можно определить асимметрию работы мышечных групп правой и левой сторон туловища.

Для более наглядного представления исследуемых параметров были внесены изменения в формулы (2–4), используемые для расчета коэффициентов латеральности α , влияния зрительного анализатора γ и влияния опорного взаимодействия σ [4].

Симметричность активности мышц правой и левой конечностей друг относительно друга отражает коэффициент латеральности α – отношение среднего значения амплитуды мышцы левой конечности к такому же показателю мышцы правой конечности (формула 2) [4]:

$$\alpha = \frac{A_{спПН} - A_{спЛН}}{A_{спПН}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $A_{спПН}$ и $A_{спЛН}$ – средние значения амплитуды мышцы правой и левой конечности соответственно.

Значение коэффициента, стремящееся к $\alpha \rightarrow 0$, свидетельствует о равномерном распределении нагрузки между правой и левой сторонами туловища, что говорит о сбалансированном развитии мышечных групп спортсмена. По отрицательному значению можно судить о том, что биоэлектрическая активность мышц левой конечности выше аналогичного параметра правой конечности.

3. Степень зависимости техники выполнения двигательного действия от участия зрительного анализатора при выполнении заданий Т1 и Т2 отражает коэффициент влияния зрительного анализатора γ , который рассчитывается по формуле (3) [4]:

$$\gamma = \frac{A_{спТ1} - A_{спТ2}}{A_{спТ1}} \times 100\%, \quad (3)$$

где A_{cpT1} и A_{cpT2} – средние значения амплитуды биоэлектрической активности прямой мышцы бедра правой конечности в заданиях T1 и T2 соответственно.

Значение коэффициента, стремящееся к $\gamma \rightarrow 0$, свидетельствует о том, что на выполнение упражнения участие зрительного анализатора не оказывает влияния, что демонстрирует высокий уровень развития проприоцептивной чувствительности. Отрицательное значение говорит о том, что биоэлектрическая активность мышц при выполнении тестового задания без использования зрительного анализатора (T2) выше аналогичного параметра при выполнении тестового задания с его использованием (T1).

4. Степень влияния изменения параметров опоры (высоты и площади) на выполнение двигательных действий заданий T1 и T3 отражает коэффициент влияния опорного взаимодействия σ , который рассчитывается по формуле (4) [4]:

$$\sigma = \frac{A_{cpT1} - A_{cpT3}}{A_{cpT1}} \times 100\% , \quad (4)$$

где A_{cpT1} и A_{cpT3} – средние значения амплитуды электрической активности прямой мышцы бедра правой конечности в тестовых заданиях T1 и T3 соответственно.

Значение коэффициента, стремящееся к $\sigma \rightarrow 0$, свидетельствует о том, что на выполнение упражнения изменение параметров опоры не оказывает влияния, что позволяет говорить о высоком уровне развития способности к равновесию. Отрицательное значение говорит о том, что биоэлектрическая активность мышц при выполнении тестового задания на повышенной и уменьшенной по площади опоре (T3) выше аналогичного параметра при выполнении тестового задания стоя на полу (T1).

5. Сравнение амплитуд сигналов верхней и нижней правых конечностей во время работы верхних конечностей (T1) отражает экономизацию энергии при выполнении двигательного действия верхними конечностями. Для получения этой информации вводим коэффициент затрачиваемой энергии η , который рассчитывается по формуле (5):

$$\eta = \frac{\sum A_{cpH}}{\sum (A_{cpB} + A_{cpH})} \times 100\% , \quad (5)$$

где A_{cpH} и A_{cpB} – средние значения амплитуды электрической активности мышц верхних и нижних конечностей соответственно.

6. Экономизацию энергии при выполнении двигательного действия нижней конечностью можно оценить по сравнению амплитуд сигналов верхней и нижней правых конечностей во время работы нижней конечности (T1). Для этого введем коэффициент затрачиваемой энергии ρ , который рассчитывается по формуле (6):

$$\rho = \frac{\sum A_{cpB}}{\sum (A_{cpB} + A_{cpH})} \times 100\% , \quad (6)$$

где A_{cpB} и A_{cpH} – средние значения амплитуды электрической активности мышц верхних и нижних конечностей соответственно.

Значения коэффициентов затрачиваемой энергии, стремящиеся к $\eta \rightarrow 0$ и $\rho \rightarrow 0$, свидетельствуют о том, что при выполнении двигательного теста T1 энергия расходуется рационально. Это является признаком хорошо развитой системы управления двигательными единицами нервно-мышечного аппарата.

На основании расчетных коэффициентов данных электромиографии (формулы 1–6) можно получить комплексную оценку уровня развития координационных способностей. С этой целью был проведен анализ расчетных коэффициентов координации 17 спортсменов разной квалификации (МС, МСМК, ЗМС), возраста (19,9±4,7 лет) и пола (8 женщин и 9 мужчин), специализирующихся в плавании и прыжках в воду (таблица 1).

В таблице 2 по результатам расчета коэффициентов координации представлены средние ранговые показатели по признакам пола, возраста и квалификации спортсменов.

Из таблицы 2 видно, что лучшим уровнем развития координационных способностей обладают представители мужского пола старше 21 года, имеющие спортивную квалификацию МСМК. По данным результатам можно сделать вывод, что на развитие координационных способностей значительное влияние оказывает наличие опыта.

Для определения степени влияния сбивающих факторов на качество выполнения двигательного действия со сложной двигательной структурой был проведен корреляционный и факторный анализ коэффициентов координации (таблицы 3–5).

Таблиця 1

Расчетные коэффициенты координации спортсменов (n=17)

Спортсмены	Коэффициенты						Сумма коэффициентов	Ранг
	КР	α	γ	σ	ρ	η		
A	2,56	0,08	-57,09	-46,04	82,47	3,43	191,67	12
B	32,99	4,82	22,50	-1,09	47,51	15,55	124,46	4
C	18,32	26,35	1,32	8,17	91,54	3,36	149,07	6
D	54,35	50,60	35,80	30,73	71,61	7,39	250,48	14
E	84,21	-11,62	16,44	9,23	27,80	7,12	156,40	8
F	11,97	5,01	8,02	-3,20	24,34	35,37	87,90	1
G	2,10	41,56	34,09	38,47	22,64	46,35	185,21	11
H	12,50	-73,90	-28,78	2,61	19,83	18,51	156,13	7
J	24,53	2,27	-4,11	-5,09	76,48	10,53	123,00	3
K	21,80	7,69	-5,97	-8,90	56,53	16,34	117,22	2
L	43,67	10,69	-22,48	19,68	48,31	27,08	171,90	10
M	13,03	-80,73	56,94	64,64	87,11	1,45	303,89	16
N	94,33	52,25	9,08	179,15	77,13	6,46	418,41	17
P	3,21	-35,52	13,97	24,09	31,19	23,02	131,00	5
Q	15,15	60,38	26,12	38,51	26,10	44,93	211,19	13
R	44,85	-3,45	82,28	70,59	88,18	2,07	291,42	15
S	16,46	52,16	11,50	22,54	59,16	5,19	167,02	9

Примечания: Полужирным выделен лучший результат; полужирным курсивом выделен худший результат

Таблиця 2

Данные среднего рангового значения по признаку пола, возраста, квалификации спортсменов

Признак	Количество человек	Сумма рангов	Среднее ранговое значение
Пол	мужской	9	78
	женский	8	75
Возраст	до 21 года	11	106
	старше 21 года	6	47
Квалификация	МС	10	103
	МСМК/ЗМС	7	50

Примечание – Полужирным выделены лучшие значения

Таблиця 3

Корреляционная матрица

Коэффициенты	КР	α	γ	σ	ρ	η
КР	1	0,253	0,187	0,571	0,172	-0,361
α		1	0,049	0,216	0,054	0,235
γ			1	0,488	0,138	-0,031
σ				1	0,223	-0,103
ρ					1	-0,776
η						1

Из корреляционной матрицы видно, что только два показателя имеют высокую положительную связь (0,571 и 0,488) – с изменением одного коэффициента прямо пропорционально изменяется другой; и один – отрицательную (-0,776) – коэффициенты координации имеют обратно пропорциональную зависимость. Значения коэффициента корреляции r при уровне значимости $P=0,05$ и числе степеней свободы $df=15$ составляет 0,482 [6].

Коэффициент реципрокности КР и коэффициент влияния опорных взаимодействий σ имеют корреляционную связь 0,571. Это показывает, что с изменением опорных взаимодействий, в данном случае выполнение тестового упражнения на повышенной и уменьшенной по площади опоре – на тумбе, прямо пропорционально изменяется взаимодействие мышечных групп типа "агонист-антагонист".

Коэффициент влияния опорных взаимодействий σ и коэффициент влияния зрительного анализатора γ имеют корреляционную связь 0,488. Это показывает, что зрительный анализатор играет важную роль в поддержании равновесия при повышенной и уменьшенной по площади опоре.

Отрицательную корреляционную связь имеют между собой коэффициенты затрачиваемой энергии ρ и η – минус 0,776. Данные коэффициенты отражают затрачиваемую энергию мышечных групп верхних конечностей (ρ) при выполнении упражнения нижними и наоборот (η).

В факторном анализе был применен метод главных компонент (таблица 4). При факторном анализе было выделено шесть факторов. Из них, при совершении операции варимакс (вращения), только два имеют значения факторных нагрузок более 0,5 и менее минус 0,5 (было принято считать факторные нагрузки существенными при этих значениях) [7].

Таблица 4

Выделение факторных нагрузок методом главных компонент

Коэффициенты	Фактор 1	Фактор 2
КР	0,71	0,30
α	0,53	-0,30
γ	0,62	0,05
σ	0,86	0,14
ρ	0,15	0,87
η	-0,02	-0,97

Первый фактор является униполярным. Его образовали следующие коэффициенты (приводятся с указанием факторных нагрузок):

- 1) Коэффициент влияния опорного взаимодействия σ – 0,86;
- 2) коэффициент реципрокности КР – 0,71;
- 3) коэффициент влияния зрительного анализатора γ – 0,62;
- 4) коэффициент латеральности α – 0,53.

Анализ полученных факторов позволяет интерпретировать первый из них как фактор организации двигательных действий (влияние окружающей обстановки, внешнего воздействия и внутренней регуляции, помехоустойчивость).

Второй фактор – биполярный. Его положительный полюс образован коэффициентом затрачиваемой энергии ρ при выполнении тестового упражнения нижними конечностями – 0,87; отрицательный полюс – коэффициентом затрачиваемой энергии η при выполнении тестового упражнения верхними конечностями – минус 0,97.

Такое распределение пунктов позволяет интерпретировать второй фактор как фактор экономизации энергии.

Значимость факторов оценивается их вкладом в общую дисперсию после вращения (таблица 5).

Таблица 5

Собственные значения факторов

Значения	Собственные значения	% общей дисперсии
Фактор 1	2,266	37,76
Фактор 2	1,565	26,09

Первый фактор (организации двигательных действий) влияет на выполнение тестовых заданий на 37,76 %, второй – фактор экономизации энергии – на 26,09 %. В общей сложности оба фактора оказывают воздействие на выполнение двигательного действия спортсменом на 63,85 %.

Выводы. Анализ биоэлектрической активности мышц предусматривает интерпретацию данных по амплитудным характеристикам, дающим представление о взаимозависимости исследуемых параметров в движениях со сложной двигательной структурой. Введение коэффициентов, отражающих симметричность работы мышц, степень их включенности и участие зрительного анализатора при выполнении двигательного действия, соразмерность затрачиваемой энергии сложности упражнения, позволяет оценить уровень развития различных видов координационных способностей и соответственно вносить своевременные коррективы в тренировочный процесс. Методику электромиографической оценкой качества движений в тестовых заданиях со сложной двигательной структурой можно рассматривать как средство объективного контроля за уровнем проявления отдельных компонентов координационных способностей спортсменов.

С помощью факторного анализа было определено количество основных факторов, влияющих на выполнение двигательного действия, – фактор организации двигательного действия и фактор экономизации энергии, показана их значимость (63,85 %) в процессе подготовки спортсменов к соревнованиям различного уровня.

Перспективами дальнейших исследований является применение разработанной методики электромиографической оценки качества выполнения двигательных действий, характеризующих состояние двигательно-координационной сферы детей, предопределяющий выбор специализации для занятий тем или иным видом спорта.

Использованные источники

1. Бернштейн, Н. А. О ловкости и ее развитии / Н. А. Бернштейн. – М.: Физкультура и спорт, 1991. – 288 с.
2. Верхошанский, Ю. В. Основы специальной физической подготовки спортсменов / Ю. В. Верхошанский. – М.: Физкультура и спорт, 1988. – 331 с.
3. Захаров, Е. Н. Энциклопедия физической подготовки / Е. Н. Захаров, А. В. Карасев, А. А. Сафонов; под ред. А. В. Карасева. – М.: Лептос, 1994. – 368 с.
4. Хохолко, А. А. Электромиографическая оценка качества движений спортсменов в тестовых заданиях со сложной двигательной структурой / А. А. Хохолко, И. Ю. Михута // Прикладная спортивная наука: сб. ст. / Реп. науч.-практич. центр спорта; редкол.: Г. М. Загородный (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – № 1 (5) – С. 39–45.
5. Команцев, В. Н. Методические основы клинической электронейромиографии : рук-во для врачей / В. Н. Команцев. – СПб., 2006. – 349 с.
6. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск: Вышэйшая школа, 1973. – 320 с.
7. Митина, О. В. Факторный анализ для психологов / О. В. Митина, И. Б. Михайловская. – М.: Учебно-методический коллектор "Психология", 2001. – 169 с.

Khakholka H., Mikhuta I.

FACTOR STRUCTURE OF THE INTERMUSCULAR COORDINATION WHEN PERFORMING TEST TASKS WITH COMPLEX MOTOR STRUCTURE

The article presents the intermuscular coordination factor structure during test tasks with complex motor structure performing and the analysis algorithm of the electromyography data of elite athletes, which characterize the components of coordination abilities. To assess the intermuscular coordination tests were used for consistency of movements that represent complexes of exercises for upper and lower extremities, which consist of three tests: test 1 – with open eyes, test 2 – closed eyes test 3 – open your eyes on high and square pillar. Algorithm of electromyographic evaluation of the athletes' motor action quality consists of calculating the coefficients of coordination, expressing the development level of the coordination abilities components, and analysis of middle rank values. Via the correlation and factor analysis was identified the influencing of the factors on the performance quality of the test tasks with complex motor structure. The correlation between the coordination coefficients and the factors influencing on the effectiveness of the exercises performing were identified. The first factor – organization of motor actions, influencing on the change of the reciprocity coefficient (RC), the laterality coefficient (α), the influence of the visual analyzer coefficient (γ) and the influencing of the support interaction coefficient (σ). The second factor – energy economization, influencing on expended energy coefficients ρ and η . The developed algorithm allows to comprehensively assess the separate components of coordination abilities in the tests that determine the effectiveness of the athletes control movements in standardized tasks with complex motor structure. The proposed methodology of electromyographic evaluation of movements quality can be used as a mean of objective monitoring of the demonstration of separate components of the athletes' coordination abilities. There are objective prerequisites of using described methodology in the selection process when choosing a specialization for children classes of sport.

Key words: wireless electromyography, coordination abilities, comprehensive evaluation, correlation and factor analysis.

Стаття надійшла до редакції 24.08.2017