

УДК 612.763+612.743
DOI: 10.26456/vtbio276

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛОКОМОЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЧРЕСКОЖНОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА*

С.А. Моисеев

Великолукская государственная академия физической культуры и спорта,
Великие Луки

Изучали кинематические синергии при произвольных локомоциях и шагоподобных движениях, инициируемых чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга. Показано высокое сходство пространственной структуры синергии при существенных различиях степени вовлечения в неё различных сегментов нижних конечностей. Наблюдаемые различия связаны с преимущественным воздействием чрескожной электрической стимуляции на ритмогенерирующую часть спинальной нейрональной сети, при этом паттернообразующая ее часть остается более стабильной.

Ключевые слова: *кинематические синергии, локомоции, электростимуляция спинного мозга, управление движением.*

Введение. Одна из существующих на сегодняшний день концепций двигательного контроля развивает представление о координации, как о механизме преодоления избыточности степеней свободы, путем объединения управляемых элементов системы в модули меньшей размерности и превращение таких образований в управляемую систему – синергии (Ting, Macpherson, 2004; Latash, 2020). В рамках концепции ведется обширная работа в нескольких направлениях, включающих рассмотрение синергий на разных уровнях их организации и различных аспектов двигательного контроля – постурального, локомоторного и произвольного. Центральной идеей концепции является представление о том, что управляющая система контролирует многочисленные степени свободы (углы, усилия и мышечные активации) так, чтобы стабилизировать важные для успешной реализации двигательной задачи переменные (Scholz, Schöner, 1999; Latash, 2020).

На кинематическом уровне исследования синергетические эффекты обнаруживаются при рассмотрении локомоций,

* Финансирование осуществлено в рамках плановой работы ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта»

постуральных задач, а также сложных по координации двигательных актов. Постулируют, что кинематические синергии могут быть частью решения проблемы избыточности степеней свободы на кинематическом уровне двигательной системы человека. Кроме того, ЦНС обладает способностью настраивать кинематические синергии в соответствии с изменяющимися требованиями двигательной задачи (Александров, Фролов, 2010; Stetter et al, 2020).

Известно, что в структуре спинальной нейрональной сети, осуществляющей управление локомоторной активностью человека, существует две независимые части (сети). Одна из них направлена на формирование кинематического паттерна характерного стереотипного движения, определяющая соотношение активации мышечных групп в структуре бегового или шагательного цикла – паттернообразующая. Вторая призвана контролировать временные параметры движений – ритмогенерирующая (Hogan, Sternad, 2007). Подход к изучению двигательных синергий с применением методов факторизации данных позволяет объективно рассматривать обе составляющие системы управления, однако, применение такого подхода в рамках концепции модульной организации двигательного контроля при рассмотрении кинематической структуры движений ранее не применялся.

В связи с этим цель работы заключалась в изучении особенностей кинематической структуры локомоций при их модуляции посредством электрической стимуляции спинного мозга. Предполагалось, что произвольные и вызванные стимуляционным воздействием на структуры спинного мозга, локомоции могут иметь схожие пространственно-временные паттерны синергетического взаимодействия на кинематическом уровне. Полученные результаты позволят расширить существующие представление об иерархической организации управления двигательной активностью человека и дадут возможность приблизиться к пониманию того, как параметры двигательной задачи кодируются в структуре синергий. Кроме того такие сведения могут быть полезны при решении прикладных вопросов совершенствования широкого спектра специализированных двигательных навыков в спортивной и трудовой деятельности.

Методика. В исследовании приняли участие 8 здоровых мужчин в возрасте от 21 до 30 лет. Исследования проведены на базе научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта. Все эксперименты проведены с соблюдением требований и принципов биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинской декларации 1964 г., и одобрены локальным биоэтическим комитетом. Каждый участник представил добровольное письменное

информированное согласие на участие в исследованиях. Испытуемые располагались в горизонтальной вывеске нижних конечностей на левом боку (Minyaeva et al., 2017). Условия эксперимента включали выполнение произвольных локомоций без стимуляционного воздействия и при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ). В анализ включали не менее 6 полных шагательных циклов (шагоподобных движений при ЧЭССМ), определяемых по крайним положениям плюсневой антропометрической точки правой ноги по сагиттальной оси.

ЧЭССМ наносилась стимулятором Биокин ЭС-5 (ООО «Косима», Россия). Стимулирующий электрод располагался между позвонками T11 и T12, два анода – симметрично над гребнями подвздошных костей, частота стимуляции – 30 Гц. Сила тока стимуляции подбиралась индивидуально и находилась в диапазоне от 30 до 90 мА. Как правило, ее было достаточно, чтобы вызвать шагоподобные движения у испытуемых (Gorodnichev et al., 2012).

Видеозахват движений сегментов тела нижних конечностей осуществлялся при помощи системы Qualisys (Швеция). Частота дискретизации составляла 500 Гц. Светоотражающие маркеры размещались на следующих антропометрических точках: плюсневой, нижеберцовой, вышеберцовой, вертельной. Оцифрованные данные (координаты антропометрических точек, скорости, ускорения, величины суставных углов) экспортировали в систему Statistica 10.0 для дальнейшего анализа. Формировали матрицу исходных данных (X), размерностью ($I \times J$), где I – число отсчетов (мгновенных измерений), а J – число независимых переменных. Переменными являлись названные выше кинематические параметры соответствующих антропометрических точек. Кроме этого матрица включала вспомогательные переменные, призванные идентифицировать граничные моменты шагательного цикла и прочие условия.

Извлечение кинематических синергий реализовывали с помощью метода главных компонент, используя стандартный модуль Statistica «Advanced/Multivariate – PCA». Исходная матрица X разлагалась на произведение двух матриц: $X = T \times P + E$, где T – матрица счетов, P – матрица нагрузок, E – матрица остатков. Рассматривали компоненты – кинематические синергии (КинС), имеющие собственные значения больше единицы и учитывающие не менее 10% общей дисперсии. Анализировали количество извлекаемых компонент, процент общей дисперсии (VAF), нагрузки (loadings) и коэффициенты активации (scores). Нагрузки показывают степень взаимосвязи рассматриваемых компонент в синергии (от 0 до 1), а коэффициенты активации отражают динамику изменений внутри каждого компонента

(Moiseev et al., 2022). Сравнение нагрузок и коэффициентов активации КинС выполняли с помощью дисперсионного (ANOVA) и кросскорреляционного анализа. Математико-статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического (M), ошибки среднего арифметического (SE), стандартного отклонения (SD).

Результаты и обсуждение. Установлено, что амплитуда движений нижеберцовой и плюсневой антропометрических точек правой ноги в среднем по группе ниже при шагоподобных движениях, вызываемых ЧЭССМ, чем при произвольных на 11,68 и 8,14 % соответственно (табл. 1). При этом отмечена бóльшая амплитуда правой вертельной точки, но не достоверно ($P > 0,05$).

Таблица 1

Амплитуда движений антропометрических точек (мм) по сагиттальной оси при произвольных локомоциях и при ЧЭССМ, $M \pm m$

Антр. точка	ПРЗВ	СТИМ	Δ %	P
Вертельная пр.	64,76±2,55	88,66±3,52	36,91	>0,05
Верхнеберцовая пр.	352,12±6,09	367,35±7,31	4,33	>0,05
Нижнеберцовая пр.	731,5±5,88	646,06±6,33	-11,68	<0,05
Плюсневая пр.	902,46±3,29	829,03±3,68	-8,14	<0,05
Верхнеберцовая лев.	286,04±12,72	307,93±1,72	7,65	>0,05
Нижнеберцовая лев.	591,38±16,13	589,65±16,89	-0,29	>0,05
Плюсневая лев.	783,36±19,03	771,27±21,82	-1,54	>0,05

Существенных различий величин суставных углов в разных экспериментальных условиях выявлено не было, отмечалась лишь незначительная разница амплитуды движений в голеностопных суставах, не превышающая 7,10 % ($P > 0,05$). Наиболее значимые различия наблюдались при сопоставлении скорости перемещений точек сегментов тела (табл. 2). Так, при ЧЭССМ регистрировалась значительно меньшая скорость, практически всех сегментов правой нижней конечности, где разница достигала 35,35 %. Несколько меньшая скорость наблюдалась и при рассмотрении антропометрических точек левой ноги. Аналогичная картина была и по показателю ускорения антропометрических точек, где разница составляла от 4,84 % до 21,44 %, в большей степени выраженная в нижеберцовой и плюсневой точках правой нижней конечности ($P > 0,05$).

Таблица 2

Средняя скорость антропометрических точек (мм/с) по сагиттальной оси при произвольных локомоциях и при ЧЭССМ, $M \pm m$

Антр. точка	ПРЗВ	СТИМ	Δ %	P
Вергельная пр.	49,11 \pm 1,54	34,38 \pm 1,36	-29,99	<0,05
Верхнеберцовая пр.	311,8 \pm 4,4	234,88 \pm 5,51	-24,67	<0,05
Нижнеберцовая пр.	639,78 \pm 12,97	418,41 \pm 14,13	-34,60	<0,05
Плюсовая пр.	786,43 \pm 16,89	508,41 \pm 18,22	-35,35	<0,05
Верхнеберцовая лев.	237,35 \pm 5,33	222,54 \pm 4,53	-6,24	>0,05
Нижнеберцовая лев.	511,09 \pm 11,16	459,64 \pm 5,42	-10,07	<0,05
Плюсовая лев.	631,53 \pm 16,88	558,15 \pm 8,9	-11,62	<0,05

Таким образом, сравнение структуры локомоций в условиях их произвольного выполнения и при ЧЭССМ, показывает существенные различия в показателях скорости и ускорений антропометрических точек, при этом, амплитуда движений сегментов тела и суставных углов практически не различается.

Исходя из цели работы были проанализированы пространственно-временные характеристики КинС. В результате было выявлено два компонента (синергии), извлеченных из всех кинематических данных. Процент объясняемой дисперсии при сравнении произвольных и вызванных ЧЭССМ локомоций существенно различался при рассмотрении скорости и амплитуды движений суставных углов, причем при стимуляции отмечались более высокие значения, достигающие 88 %. Это свидетельствует о том, что структура локомоторного цикла, инициируемая ЧЭССМ, обладает большей стабильностью и высокой воспроизводимостью в сравнении с произвольно выполняемыми локомоциями.

В первую очередь обращает на себя внимание четкая дифференциация нагрузок КинС перемещений точек левой и правой нижних конечностей (рис. 1А). При стимуляции сохраняется характерная картина, однако отмечаются более низкие коэффициенты при ЧЭССМ. Аналогичная картина наблюдается и во второй синергии. Таким образом кинематический рисунок локомоций остается стабильным и в значительной степени схожим при произвольной ходьбе и при локомоциях, инициируемых ЧЭССМ. Сходство векторов синергии находилось в диапазоне 0,98 \pm 0,14 в первой синергии и 0,70 \pm 0,09 во второй. Это свидетельствует о том, что стимуляция не затрагивает или незначительно воздействует на паттернообразующую часть нейрональной сети, регулирующей шагательный цикл. При рассмотрении КинС скоростей антропометрических точек

установлены существенные различия коэффициентов нагрузок и векторов КинС (рис. 1Б). Сходство векторов синергии здесь не превышало $0,77 \pm 0,04$ для первой синергии и $0,04 \pm 0,01$ для второй. Анализируя кинематические нагрузки и векторы синергий суставных углов существенные различия коэффициентов нагрузок коленного и тазобедренного суставов правой ноги ($P > 0,05$), а наибольшие коэффициенты регистрировались в голеностопных суставах обеих нижних конечностей.

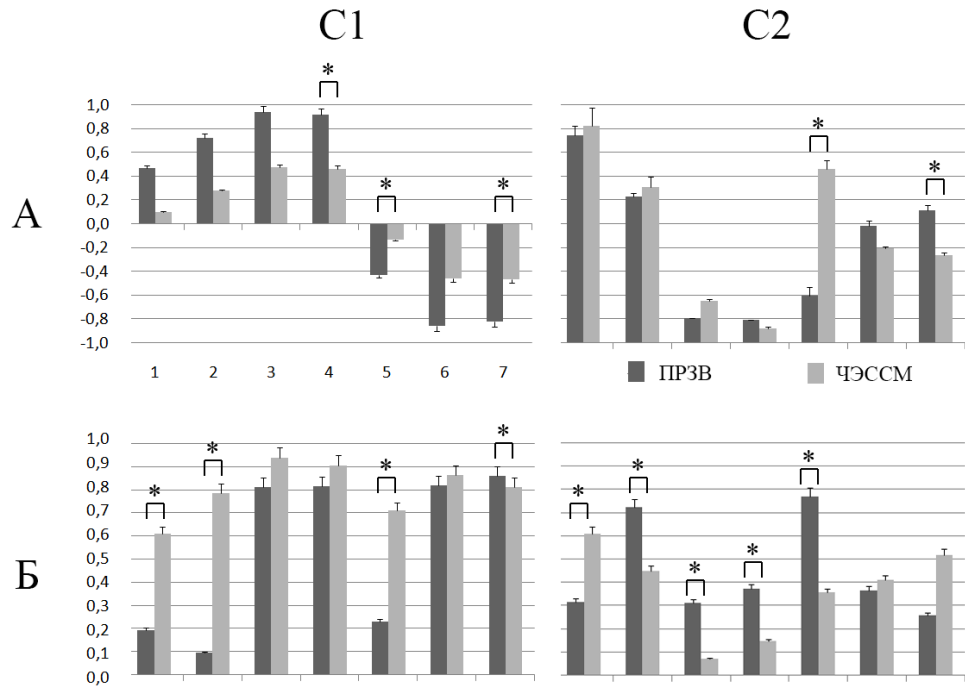


Рис. 1. Нагрузки и векторы КинС в условиях произвольных локомоций и вызываемых ЧЭССМ: А – КинС перемещений антропометрических точек, Б – КинС скоростей. С1,2 – номер синергии. 1 – вертельная пр., 2 – верхнеберцовая пр., 3 – нижнеберцовая пр., 4 – плюсовая пр., 5 – верхнеберцовая лев., 6 – нижнеберцовая лев., 7 – плюсовая лев. * – достоверно, при $P < 0,05$.

Временная структура КинС, извлеченных из различных наборов данных, включающих данные о величинах перемещений, скоростей и ускорений антропометрических точек представлены на рисунке 2. Обращает на себя внимание высокое соответствие коэффициентов активации первой синергии при произвольных локомоциях и вызываемых ЧЭССМ. Так, коэффициенты соответствия превышали $0,92 \pm 0,11$, а с учетом разделения локомоторного цикла на две части, ориентируясь на направление движения можно говорить об очень высоком соответствии временной структуры – более $0,99 \pm 0,01$ (рис. 2А). КинС скоростей антропометрических точек сегментов тела

демонстрировали низкое соответствие в разных экспериментальных условиях. Можно отметить несколько большее соответствие коэффициентов активации второй синергии в первой половине шагательного цикла (рис. 2Б). КинС ускорений не демонстрировали динамики изменений в процессе цикла шага, а различия при сравнении их в условиях произвольной ходьбы и при ЧЭССМ оказывались существенными. Сравнение коэффициентов активации КинС амплитуды движений суставных углов показало высокое их сходство, также в большей степени проявляющееся в первой половине цикла шага – более $0,99 \pm 0,02$.

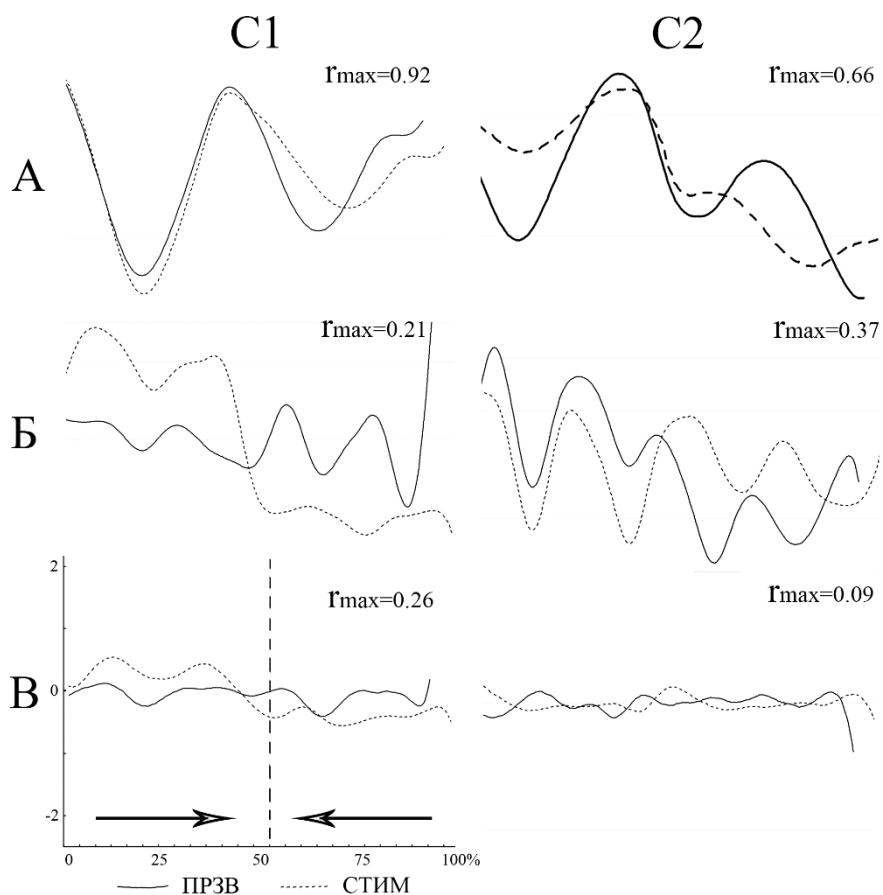


Рис. 2. Коэффициенты активации КинС при произвольных и вызываемых ЧЭССМ локомоция: А – КинС перемещений, Б – КинС скоростей, В – КинС ускорений. По оси абсцисс – прогресс цикла шага, по оси ординат – у.е. Стрелками показано направление движений ноги по сагитальной оси. С1,2 – номер синергии.

Заключение. Таким образом, компоненты, выявляемые при факторизации данных, включающие вариационные ряды перемещений, скоростей и ускорений антропометрических точек

сегментов тела, а также величины суставных углов, образуют две синергии. Сравнительный анализ пространственной их структуры в условиях произвольно выполняемых локомоций и при шагоподобных движениях, инициируемых ЧЭССМ показывает высокое сходство паттернов синергий, но отмечаются существенные различия в степени вовлечения различных сегментов нижних конечностей в синергию. Временная структура кинематических синергий при произвольной ходьбе и при ЧЭССМ имеет схожие паттерны по данным перемещений и величинам суставных углов, преимущественно в первой половине цикла шага. Наблюдаемые закономерности пространственно-временной структуры кинематических синергий, вероятно, связаны с преимущественным воздействием чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на ритмогенерирующую часть спинальной нейрональной сети, при этом паттернообразующая часть синергии остается более стабильной.

Список литературы

- Александров А.В., Фролов А.А.* 2010. Организация прямого двигательного управления при наклонах корпуса человека // Российский журнал биомеханики. Т. 14. № 3. С.19-35.
- Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Puhov A., Moiseev S.A., Gerasimenko Y.P., Savochin A.A., Moshonkina T.R., Chsherbakova N.A., Kilimnik V.A., Selionov V.A., Kozlovskaya I.B., Edgerton V.R.* 2012. Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: a noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans // *Human Physiology*. V. 38. № 2. С.158-167.
- Hogan N., Sternad D.* 2007. On rhythmic and discrete movements: reflections, definitions and implications for motor control// *Exp Brain Res* V. 181. № 1. P. 13-30.
- Latash M.L.* 2020. On Primitives in Motor Control // *Motor Control*. V. 24. № 2. P. 318-346.
- Minyaeva A.V., Moiseev S.A., Pukhov A.M., Savokhin A.A., Gerasimenko Y.P., Moshonkina T.R.* 2017. Response of external inspiration to the movements induced by transcutaneous spinal cord stimulation // *Human Physiology*. V.43. № 5. P. 43-51.
- Moiseev S., Pukhov A., Mikhailova E. et al.* 2022. Methodological and computational aspects of extracting extensive muscle synergies in moderate-intensity locomotions // *J Evol Biochem Phys*. № 58. P. 88-97.
- Scholz J.P., Schöner G.* 1999. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task // *Exp Brain Res*. V. 126. № 3. P. 289-306.
- Stetter B.J., Herzog M., Möhler F., Sell S., Stein T.* 2020. Modularity in Motor Control: Similarities in Kinematic Synergies Across Varying Locomotion Tasks // *Front Sports Act Living*. № 2. P. 596063.
- Ting L.H., Macpherson J.M.* 2005. A limited set of muscle synergies for force control during a postural task // *Journal of Neurophysiology*. V. 93. № 1. P. 609-613.

SYNERGETIC CONTROL OF THE LOCOMOTION'S KINEMATIC STRUCTURE UNDER THE SPINAL CORD TRANSCUTANEOUS STIMULATION

S.A. Moiseev

Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikiye Luki

We studied the kinematic synergies during voluntary locomotion and step-like movements initiated by transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord. A high similarity of the spatial structure of synergy was shown with significant differences in the degree of involvement of various segments of the lower extremities. The observed differences are associated with the predominant effect of transcutaneous electrical stimulation on the rhythm-generating part of the spinal neuronal network, while its pattern-forming part remains more stable.

Keywords: *kinematic synergies, locomotion, electrical stimulation of the spinal cord, motor control.*

Об авторе

МОИСЕЕВ Сергей Александрович – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательского института «Проблем спорта и оздоровительной физической культуры» Великолукской государственной академии физической культуры и спорта, 182105, Великие Луки, пл. Юбилейная 4, e-mail: sergey_moiseev@vlgaafc.ru.

Моисеев С.А. Синергетический контроль кинематической структуры локомоций в условиях чрезкожной стимуляции спинного мозга / С.А. Моисеев // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2022. № 4(68). С. 15-23.