



## ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ И КООРДИНАЦИИ ДВИЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ НЕЙРОНОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

*В.Б. Казанцев, В.И. Некоркин*

В работе рассматривается вопрос о принципах контроля и координации движений на основе динамики нейронов центральной нервной системы. Предложена схема координации и точной настройки движений в соответствии с современными представлениями нейрофизиологов о структуре и функциях центральной нервной системы и с методами прикладной нелинейной динамики. Схема включает блок дискретного контроля движений, отражающего функции оливо-церебеллярной системы животных и человека. Приведен пример контроля и координации простейших локомоторных движений робота – платформы с шестью конечностями.

### Введение

Современные представления о структуре и функциях различных частей головного мозга животных и человека значительно расширились благодаря возможностям современных технологий и опираются на большое число нейрофизиологических экспериментов и теоретических исследований [1–7]. В таком чрезвычайно сложном объекте как головной мозг удается выделить определенные структурные звенья – группы нейронов, «ответственные» за ту или иную функцию. Например, таламо-кортикальная петля (thalamocortical circuit), состоящая из взаимодействующих групп нейронов таламуса и коры головного мозга, отвечает за образование спонтанной (40 Гц) колебательной активности, которая, по мнению физиологов, связана со способностью ассоциативного восприятия [5]. Другой пример – оливо-церебеллярная функциональная петля (olivocerebellar circuit), включающая нейроны нижних олив (inferior olives) и мозжечка (cerebellum) и отвечающая за формирование другого универсального ритма (10 Гц) в центральной нервной системе (ЦНС) [6,7]. Этот ритм, по мнению физиологов, как напрямую, так и косвенно связан с различными функциями координации движений – точной настройки, коррекции ошибок, контроля запрещенных движений и т.д. Как оказывается, любое движение происходит не непрерывно, а в некотором смысле (кинематическом) последовательно, то есть имеет характерный временной масштаб, определяемый частотой  $\sim 10$  Гц. Этот временной масштаб означает, что нервная система осуществляет контроль за сокращением мышц не чаще чем через временной интервал  $\sim 100$  мс, что позволяет, во-первых, сократить «вычислительные ресурсы», необходимые для контроля за движением; во-вторых, придать движению определенную «эластичность» – возможность адаптации к внешним условиям, точной настройки и т.д.

Важнейшим прикладным аспектом исследования проблем координации движений является создание на основе нейрофизиологических принципов автономных машин – роботов, способных осуществлять различные двигательные функции. Простейшими из этих функций являются устойчивые *локомоторные движения* – движения, связанные с перемещением в пространстве. Такие движения в живых организмах ассоциируются с функциями центрального генератора ритма (ЦГР) в нервной системе. ЦГР задает «шаблон» – ритм, по которому происходит возбуждение моторных нейронов, ответственных за движение. Существует большое количество моделей ЦГР, основанных как на реальных нейрофизиологических исследованиях, так и на функциональном моделировании [8–11]. К простейшим функциональным моделям можно отнести малые ансамбли взаимодействующих осцилляторов, которые за счет различных режимов синхронизации способны выделять тот или иной «шаблон» движения [12–14]. Например, на рис. 1 представлена фотография шестиногого робота – платформы, «ноги» (конечности) которого управляются фазами шести осцилляторов. В процессе разработки таких машин кроме проблем создания моделей ЦГР возникает множество других задач, включающих вопросы динамики сочленений ноги, устойчивости движения, поддержания постоянной скорости, горизонтального положения платформы и т.д. [12,15]. Отметим, что основной ролью ЦГР является создание грубого «шаблона», определяющего лишь общий ритм перемещения. По существу не решенным остается вопрос об адаптации движения к различным условиям внешней среды, точной настройке (например, выбора оптимальной точки следующего шага), эффективной смене ритма движения и т.д. Решение этой проблемы требует принципиально новых подходов, основанных на современных представлениях о принципах функционирования ЦНС.

В этой работе мы предлагаем новую схему контроля и координации движений, включающую принцип дискретного контроля за движением, подобно упомянутой выше роли – 10 Гц колебаний оливо–цереbellарной петли в ЦНС. В качестве примера рассматриваем локомоторные движения платформы с шестью точками опоры по неровной поверхности.

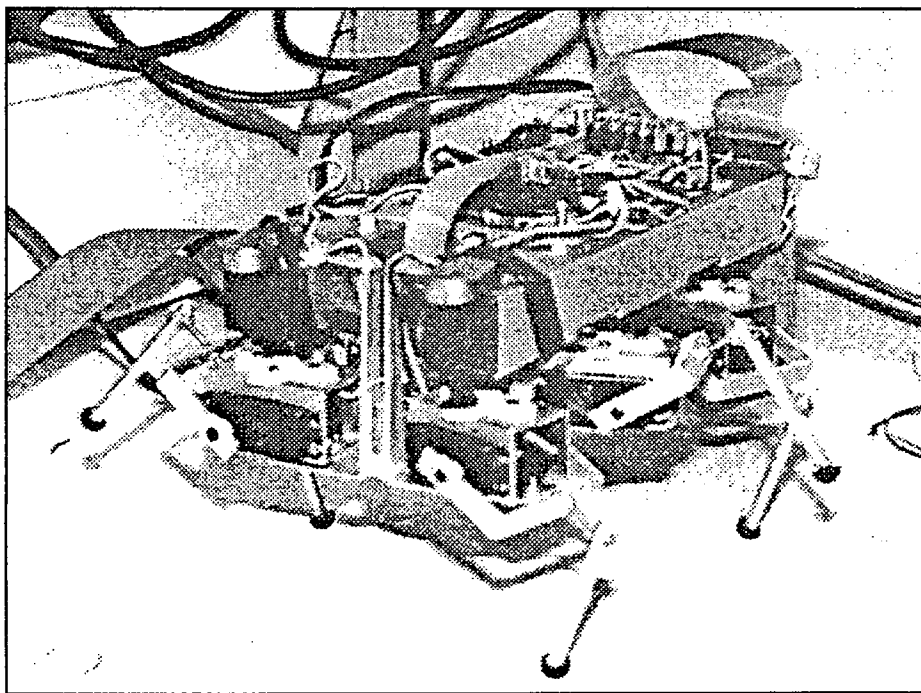


Рис. 1. Фотография робота с шестью конечностями, управляемого шестью независимыми осцилляторами [11]

## 2. Структурная схема

Любая система управления движением как в живых организмах, так и в искусственных моделях должна удовлетворять нескольким общим требованиям. Прежде всего, она должна обеспечивать устойчивость движения по отношению к малым возмущениям (как внутренним, так и внешним). Это стандартная задача линейной устойчивости. Кроме того, система должна включать в себя определенный механизм (алгоритм) принятия решений. В частности, она должна быть способна изменять шаблон колебаний ЦГР в зависимости от внешних и внутренних факторов, например, при изменении условий поверхности или внутренней «поломке» (отказ одной из конечностей). Для получения информации о внешней среде необходимо наличие различных сенсорных входов. Следовательно, система управления движением естественным образом содержит петли обратной связи. Наличие подобной структурной схемы в живой природе было подтверждено физиологами при исследовании различных животных. Например, на основе экспериментов была смоделирована система координации движений морского угря, способная к адаптации в различных условиях [9,10].

Схема координации движений, которую мы предлагаем, представлена на рис. 2. Она состоит из нескольких функциональных блоков. Блок I является объектом управления, и в данном случае его функциями будем считать простейшие локомоторные движения шести конечностей. Для простоты предполагаем, что каждая конечность управляется одним осциллятором, фаза которого определяет ее положение относительно поверхности. Блок II – блок команд, вырабатывающий

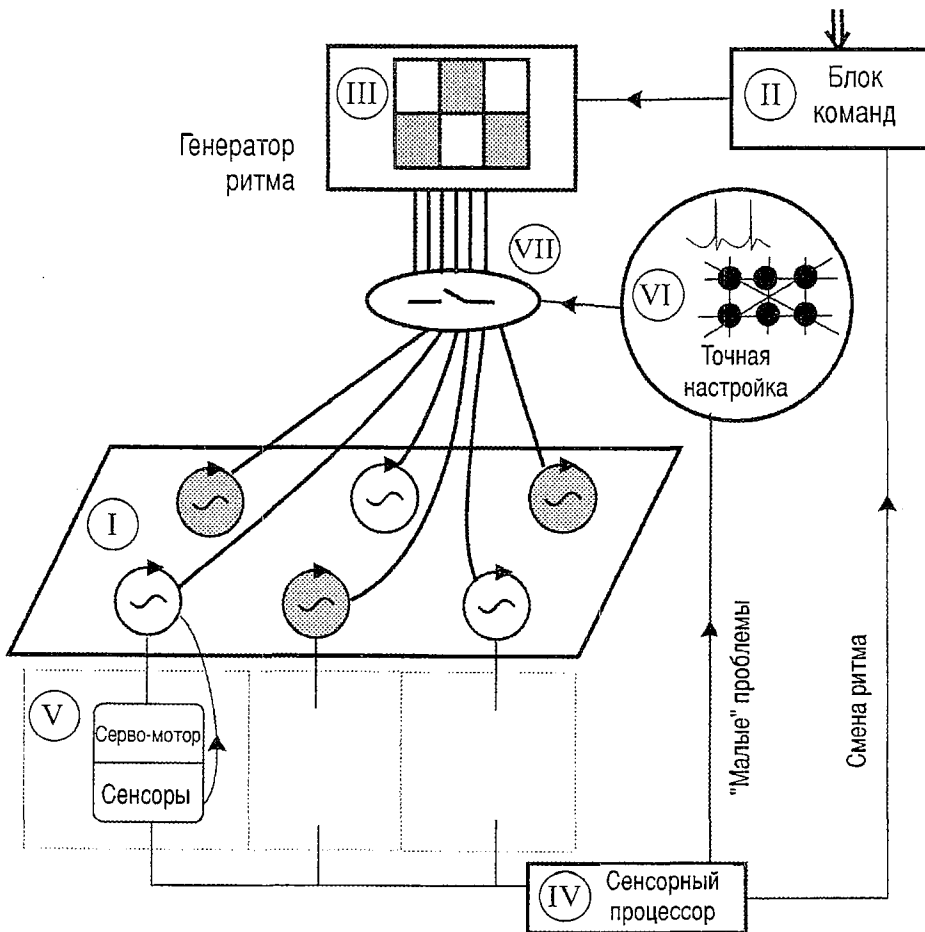


Рис. 2. Схема дискретного контроля и координации движений применительно к локомоторным движениям робота с шестью конечностями

команды для генератора ритма (ЦГР, блок III) о смене «шаблона» (ритма) движения. Он может получать сигналы как о принудительной смене ритма (стрелка сверху), так и от блока обработки сенсорной информации IV, когда смена ритма движения диктуется изменениями условий внешней среды (например, появление непреодолимой преграды). Блок V (конечность) осуществляет непосредственный контакт объекта с внешней средой (поверхностью) и имеет собственный механизм адаптации для решения «локальных» проблем. Например, если по ходу движения конечность попадает на небольшую неровность, то необходимо лишь слегка затянуть или ускорить фазу управляющего осциллятора, не производя при этом глобальной перестройки ритма всех остальных конечностей. Блок VI выполняет функцию точной настройки и контроля за движением. Он получает сенсорную информацию с блока IV и вырабатывает управляющий сигнал для всех шести конечностей в соответствии с текущим состоянием объекта и условиями внешней среды. Блок VII – переключатель, отключающий объект от «высших» управляющих центров. Отметим, что совместно блоки VI и VII в схеме выполняют роль оливо–церебелларной петли, упомянутой выше. Переключатель вырабатывает тактирующий сигнал (в оливах 10 Гц), и лишь в определенные моменты времени управляющая информация о текущем ритме (ЦГР, блок III) поступает к объекту. В перерывах между контрольными импульсами объект предоставлен «сам себе» – движется свободно по предложенному на предыдущем такте шаблону, решает «локальные проблемы» и т.д. Отметим здесь принципиальную роль эффектов кластеризации и быстрого разрушения кластеров, наблюдаемых физиологами в нижних оливах. Упрощенно распределение кластеров в нейронах олив представляет собой шаблон (тензор) мышечных сокращений, разрушение которого объясняется необходимостью новых уточненных настроек в процессе движения [3,4].

## 2. Модели элементов схемы

Рассмотрим возможные варианты реализации различных блоков общей структурной схемы (см. рис. 2). Среди них можно выделить два основных подхода. Первый заключается в построении систем, «анатомически» соответствующих реальному природному аналогу. Их элементами являются модели нейронов с реальными параметрами (учитывающие динамику ионных токов, синаптические входы и выходы и т.д.). Примером такого типа моделей является уже упомянутая выше модель движений угря. Недостатком таких систем является их чрезвычайная сложность, поскольку необходимо учитывать огромное число параметров и динамических переменных. Это вызывает очевидные трудности их исследования и прикладного использования. Другой подход, интенсивно развивающийся в последние годы, заключается в моделировании не внутренней динамики, а лишь поведения и функций нейрона или группы нейронов, вовлекаемых в общую схему [12–14]. Этот подход, на наш взгляд, наиболее интересный и перспективный, мы и будем применять к схеме рис. 2.

В качестве модели элементов конечностей (блоки I, V) для простоты выберем простейшие генераторы (Ван дер Поля) синусоидальных колебаний [16], уравнения которых в амплитудах и фазах имеют вид

$$\begin{cases} \dot{r}_j = r_j (A^2 - r_j^2), \\ \dot{\phi}_j = \omega + f(t), \\ j = 1, 2, \dots, 6, \end{cases} \quad (1)$$

и для колебаний каждого генератора можно записать  $x_j = A \cos(\omega t + \phi_j(t) + \psi_j)$ ,  $\phi_j(t) = \int f(t) dt$ ,  $\psi_j(t)$  – некоторая функция времени, динамика которой будет описана ниже.

Предполагаем, что фаза колебаний каждого осциллятора однозначно определяет положение конечности. Пусть для определенности отрицательный полупериод означает, что конечность находится на поверхности, положительный – совершает перемещение.

Блок III – генератор ритма, фактически, задает определенные фазовые соотношения  $\psi_j$  между осцилляторами, то есть формирует некоторую стационарную структуру (паттерн). Такой паттерн можно получить, например, с помощью решетки бистабильных элементов вида [17]

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_j &= g(\psi_j) + d(\Delta\psi)_j, \\ j &= 1, 2, \dots, 6, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $g$  – нелинейная функция кубической формы,  $\Delta$  определяет функцию связи данного элемента с соседними (например, линейная, «диффузионная»,  $(\Delta\psi)_j = \psi_{j-1} - 2\psi_j + \psi_{j+1}$ ). Как показано в [17], система (2) может формировать до  $2^6$  различных пространственных структур, каждая из которых определяет различные фазовые соотношения между осцилляторами (1). Выбор той или иной структуры (ритма) определяется блоком команд II. Переменные фазы осцилляторов  $\varphi_j(t)$  управляются петлями локальной обратной связи (блок V) и блоком точной настройки VI. При учете всех факторов их динамика будет чрезвычайно сложной. Мы учтем лишь основные из них, наиболее существенные для общих принципов управления. Введем *правила* или алгоритм действия систем обратной связи применительно к движению конечности по неровной поверхности. Для локальной обратной связи их можно сформулировать, например, таким образом:

- если конечность не находит опору (поверхность) в ожидаемый момент времени, то необходимо ускорить фазу соответствующего осциллятора (рис. 3, а);
- если конечность находит опору раньше, чем ожидалось, то фазу соответствующего осциллятора необходимо задержать (рис. 3, б).

Тогда, для координации движений всех конечностей (блок VI) *правила* управления будут иметь следующий вид:

- если конечность не находит опору (поверхность) в ожидаемый момент времени, то фазы остальных конечностей необходимо задержать;
- если конечность находит опору раньше, чем ожидалось, то фазы остальных конечностей необходимо ускорить.

Отметим, что эти правила относятся лишь к «малым» возмущениям (неровностям) движения и стремятся отразить лишь основной (статический) критерий устойчивости – *платформа устойчива, если в каждый момент времени имеет по крайней мере три точки опоры*. Для реализации указанных правил введем следующую динамическую систему:

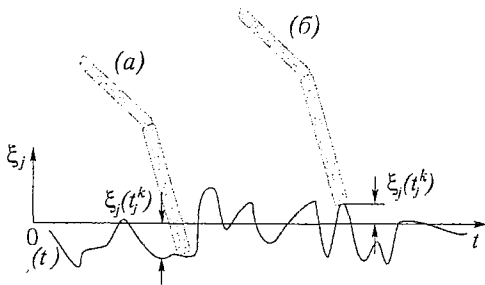


Рис. 3. Движение конечности по неровной поверхности. Функция  $\xi_j(t)$  описывает рельеф поверхности в системе отсчета, движущейся вместе с  $j$ -й конечностью

$$\alpha \dot{\varphi}_j = (-a_0 s_j(t^k) - \varphi_j) +$$

$$+ \sum_{i=1, i \neq j}^6 (a_i s_i(t^k) - \varphi_i) + F(\varphi_j, \psi_j, u), \quad (3)$$

где коэффициент  $a_0 > 0$  характеризует петлю локальной обратной связи, набор  $a_i > 0$  – совместную подстройку всех шести конечностей;  $\alpha$  характеризует «скорость» подстройки; функция  $s_j(t^k)$  моделирует сигналы сенсоров конечности, определяющих рельеф поверх-

ности на  $k$ -м шаге. Например, если сенсор отслеживает (линейно) изменения расстояния до поверхности, эту функцию можно записать в виде  $s_j(t) = \xi_j(t_j^k)$ , где  $t = t_j^k$  – время касания конечностью идеально плоской поверхности,  $\xi_j(t_j^k)$  – расстояние до реальной точки поверхности (см. рис. 3). Функция  $F$  выполняет роль «переключателя» (блок VII), с помощью которого в определенные моменты времени корректируются взаимные фазовые соотношения всех шести осцилляторов. Отметим, что введенные правила и система (3) не описывают количественные характеристики движения, то есть не определяют, насколько нужно изменить фазу колебаний в том или ином случае. Для этого в соответствии с конкретной реализацией конечности и условиями движения необходимо вводить дополнительные критерии оптимизации параметров  $\alpha, a_j$ . Мы не рассматриваем эту задачу здесь.

Поясним действие системы подстройки (3) на примере локального механизма ( $a_j = 0, F \equiv 0$ ). В этом случае динамика фаз  $\varphi_j$  описывается простым уравнением первого порядка. Координаты состояний равновесия этого уравнения (на промежутке шага)  $\varphi_j^0 = -a_0 s_j(t_j^k)$  изменяются в зависимости от сенсорного сигнала  $s_j$ , ускоряя ( $s_j < 0$ ) или замедляя ( $s_j > 0$ ) фазу соответствующего осциллятора.

Пусть функция  $F$  имеет вид

$$F(\varphi_j, \psi_j, u) = \begin{cases} 0, & j = 1, \\ 0, & u < u_0, \\ -\beta((\varphi_j - \varphi_{j-1}) - (\psi_j - \psi_{j-1})), & u > u_0. \end{cases} \quad (4)$$

Первое соотношение означает, что фаза первой конечности,  $j=1$ , выбирается в качестве опорной и не корректируется. Если  $u < u_0$  ( $u_0$  – некоторое «пороговое» значение), фазы осцилляторов не зависят от генератора ритма и управляются в соответствии с внешними условиями (сигналы  $s_j(t)$ ). В промежутке времени, когда  $u > u_0$ , сдвиги фаз осцилляторов подправляются относительно одной опорной фазы,  $j=1$ , обеспечивая заданный «шаблон» движения. Коэффициент  $\beta$  в (4) определяет характерное время действия системы корректировки.

Как уже отмечалось выше, действие такой корректировки подобно функциям оливо-церебеллярной петли в живых организмах. Поэтому для получения управляющего сигнала  $u(t)$  введем в рассмотрение функциональную модель нейрона оливы, предложенную ранее в работах авторов [18,19],

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega(u, I), \\ \dot{\rho} = \rho(\gamma(u, I) - \rho^2), \\ \epsilon \dot{u} = f(u) - v + \rho \cos \theta, \\ \dot{v} = p(u - I). \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) состоит из двух подсистем, первая из которых (переменные  $(\rho, \theta)$ ) отвечает за квазисинусоидальные подпороговые колебания нейрона (10 Гц), а вторая (переменные  $(u, v)$ ) – за образование управляющего импульса на максимуме подпороговых колебаний. Функция  $f(u) = u(1-u)(u-a)$ ,  $0 < a < 1$  имеет вид кубической параболы. Амплитуда и частота подпороговых колебаний (функции  $\gamma(u, I)$  и  $\omega(u, I)$ ) могут изменяться в зависимости от состояния нейрона (переменная  $u$ ) и от уровня внешней стимуляции (параметр  $I$ ). Для наших целей использования нейрона как управляющего генератора положим  $\omega(u, v) = \omega_0$ ,  $\gamma(u, I) = \gamma_0$ . Так, при  $I < I_0$  система (5) не достигает порога возбуждения  $u < u_0$ , а при  $I > I^*$  управляющие импульсы возникают на каждом периоде подпороговых колебаний.

### 3. Управление движением

Рассмотрим теперь несколько примеров управления движением с помощью предложенной схемы (см. рис. 2) и динамической системы (1)–(5). Зафиксируем для удобства параметры:  $\varepsilon=0.01$ ,  $a=0.01$ ,  $b=2$ ,  $\omega_0=0.15$ ,  $\gamma_0=1$ ,  $\omega=0.1$ ,  $\alpha=5$ ,  $\beta=1$ ,  $p=0.1$ . Выберем так называемый «быстрый ритм» ходьбы, когда две группы синфазных осцилляторов установлены в противофазе друг с другом (см., например, [11]). Соответствующий «шаблон» генератора ритма – пространственная структура решетки (2) – показан на рис. 2 (блок II). Пусть сначала лишь одна из конечностей движется по неровной поверхности ( $s_1(t)=\xi(t)$ ,  $s_j, j \neq 1(t)=0$ ), и управляющие импульсы отсутствуют,  $I < I_0$ . Динамику двух соседних конечностей в этом случае ( $j=1, 2$ ) иллюстрирует рис. 4. На рис. 4, а действует только локальная (блок V на рис. 2)

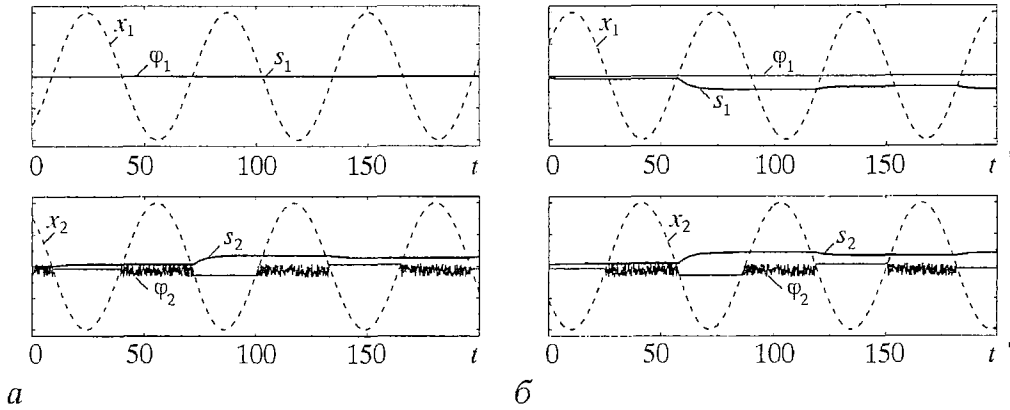


Рис. 4. Динамика систем (1)–(5) при отсутствии контролирующего сигнала,  $I=0.5$  ( $u < u_0$ ). Только одна конечность ( $j=2$ ) движется по неровной поверхности, рельеф которой задается в виде случайной функции  $\xi_j$ , равномерно распределенной,  $I < I_0$ ; а – включена локальная подстройка (блок V),  $a_0=2$ ,  $a_j=0$ ,  $j=1, 2, \dots, 6$ ; б – включена локальная и глобальная коррекция «малых» ошибок,  $a_0=2$ ,  $a_j=1$ ,  $j=1, 2, \dots, 6$

подстройка фаз второго осциллятора ( $j=2$ ). Действительно, при касании поверхности фаза этого осциллятора изменяется согласно введенным выше правилам. Действие глобальной системы координации «малых проблем» (блоки IV, VI) показано на рис. 4, б. Здесь фаза соседнего осциллятора также изменяется,

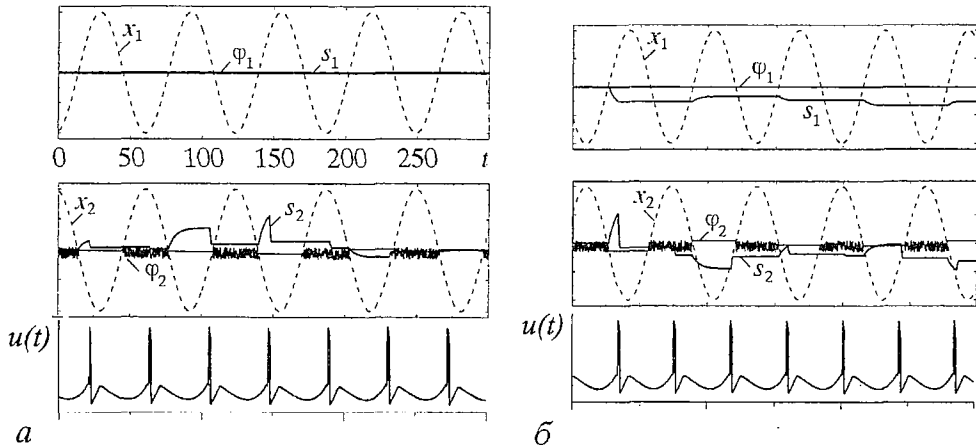


Рис. 5. Динамика систем (1)–(5) для случая рис. 4, но при включении контролирующего сигнала,  $I=0.25$  (блок VII); а – включена локальная подстройка (блок V),  $a_0=2$ ,  $a_j=0$ ,  $j=1, 2, \dots, 6$ ; б – включена локальная и глобальная коррекция «малых» проблем,  $a_0=2$ ,  $a_j=1$ ,  $j=1, 2, \dots, 6$

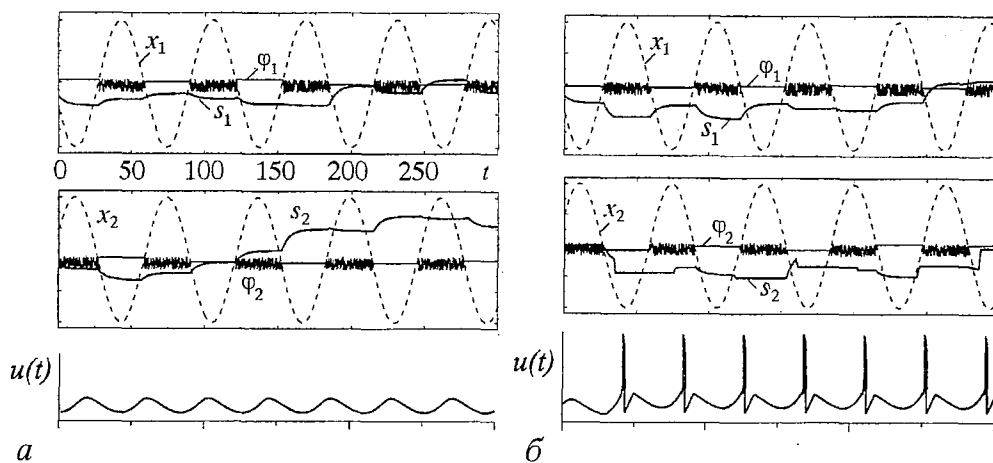


Рис. 6. Динамика систем (1)–(5) при условии, что все конечности движутся по неровной поверхности. Параметры:  $a_0=2$ ,  $a_j=1$ ,  $j=1,2,\dots,6$ ; а – контролирующий сигнал отсутствует,  $I=0.5$ ; б – включена система дискретного контроля,  $I=0.25$

ускоряясь или замедляясь в зависимости от рельефа поверхности. Отметим, что при отсутствии управляющего сигнала переключатель (блок VII) всегда разомкнут и платформа не связана с генератором ритма (блок III). Поэтому в процессе автоподстройки фазовые соотношения между осцилляторами слегка нарушаются. Появление управляющих импульсов ( $I > I^*$ ) связывает в определенные моменты времени платформу с генератором ритма, корректируя нарушенные сдвиги фаз (рис. 5, а, б). На рис. 6 все шесть конечностей движутся по неровной поверхности и оба механизма подстройки (локальный и глобальный) включены. В этом случае динамика фаз осцилляторов становится более сложной; однако при включении управляющего сигнала  $I > I^*$  (рис. 6, б) система снова стремится установить правильные фазовые соотношения. На рис. 7 представлены фазы всех шести осцилляторов. Очевидно, что изменение фаз осцилляторов происходит при касании одной из конечностей поверхности (механизмы подстройки) и при получении управляющего сигнала (механизм корректировки).

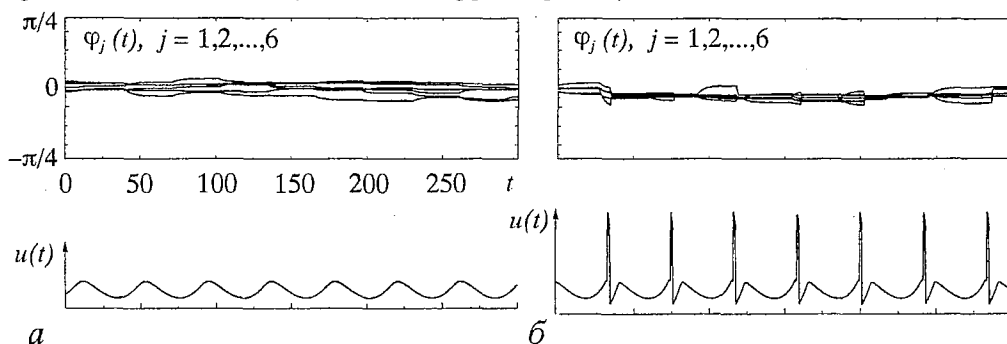


Рис. 7. Эволюция фаз осцилляторов, соответствующих шести конечностям, при отсутствии (а) и включении (б) системы координации (локальная и глобальная) и система дискретного контроля движений (см. рис. 6). На графике нулевое значение фаз отвечает идеальной настройке (согласно генератору ритма)

#### 4. Обсуждение

В заключение отметим, что проблема создания реального устройства контроля и координации движений включает в себя кроме затронутых здесь аспектов множество других и является чрезвычайно сложной. Даже в



рассмотренном нами простейшем примере управления локомоторными движениями необходимо учитывать большое число различных факторов и условий. В частности, в реальных прототипах конечность должна состоять из нескольких сочленений, связанных кинематическими соотношениями, каждое из которых имеет собственную систему подстройки; конечности не являются идентичными и управляются в общем случае различными сигналами; механизм автоподстройки необходимо оптимизировать с учетом как внутренних ограничений, так и внешних условий; обработка сенсорной информации имеет свои особенности и т.д.

Основные преимущества подхода, изложенного в этой работе, относятся к принципам контроля и координации движений, возможно, более сложных, чем простое перемещение в пространстве, и основываются на современных представлениях нейрофизиологов о функционировании животных и человека. В частности, во-первых, введение многоуровневых систем обработки сенсорной информации позволяет разделить задачу об адаптации движения к условиям внешней среды на несколько уровней. Тогда часть проблем может решаться на «низшем» («мышечном») уровне, не затрагивая основных ресурсов ЦНС. Во-вторых, принцип дискретного контроля придает системе «эластичность» и возможность более точной настройки. Кроме того, и это очень важно, сокращаются «вычислительные затраты», что в случае более сложных движений оказывается весьма существенным. Например, по утверждению физиологов, простейшее движение руки человека вовлекает не менее 50–ти различных мышц [3]. Существует  $10^{15}$  возможных комбинаций их одновременных сокращений. Если каждую миллисекунду выбирать наилучшую из этих комбинаций, то в течение секунды мозг должен принимать  $10^{18}$  решений. Это эквивалент процессора с тактовой частотой  $10^{16}$  ГГц – лишь для того, чтобы в реальном времени выбрать нужную комбинацию! Более того, явления кластерообразования и изменения кластеров в соответствии с «шаблоном» (тензором) мышечных сокращений в оливо–церебеллярной системе, составляющей прототип системы дискретного контроля, открывает возможность регулирования на принципах самоорганизации динамических систем. Например, при отказе одной или нескольких мышц система должна сформировать альтернативное распределение кластеров, позволяющее выполнить поставленную задачу.

Предложенный в работе вариант схемы контроля и координации движений основывается на функциональном моделировании нейрофизиологических принципов управления, эффективность которых видна даже на простых примерах. При моделировании используются не логические, а динамические элементы (генератор Ван дер Поля, система Фитц Хью–Нагумо, бистабильная решетка). Это позволяет говорить, во-первых, об управлении движением не на программной основе, а на основе принципов самоорганизации [20]. Во-вторых, с прикладной точки зрения, такие системы могут быть сравнительно легко реализованы в виде электронных схем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 00–02–16400).*

## **Библиографический список**

1. Principles of Neural Science/ Eds E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell. Third Edition. Prentice–Hall Intern. Inc. 1991. 1135 p.
2. Llinas R. The intrinsic electrophysiological properties of mammalian neurons: insight into central nervous system function // Science. 1988. Vol. 242. P. 1654.
3. Welsh J.P., Llinas, R. Some organizing principles for the control of movement based on olivocerebellar physiology/ Eds C.I. de Zeeuw, P. Strata and Voodg // Progress in Brain Research. 1997. Vol. 114.
4. Pellionisz A., Llinas R. Tensor theory of brain function. The cerebellum as a space–time metric tensor // Lecture Notes in Biomathematics. Springer–Verlag, Berlin. 1982. Vol. 45. P. 394.

5. *Llinas R.* Oscillations in CNS neurons: A possible role for cortical interneurons in the generation of 40-Hz oscillations // Repr. from the book *Induced Rhythms in the Brain*/ Eds E. Basar, T. Bullock. 1991.

6. *Llinas R., Yarom Y.* Oscillatory properties of guinea-pig inferior olivary neurons and their pharmacological modulation: An *in vitro* study // *J. Physiol., Lond.* 1986. Vol. 376. P. 163.

7. *Schweighofer N., Doya K., Kawato M.* Electrophysiological properties of inferior olive neurons: a compartmental model // *Journal of Neurophysiology.* 1999. Vol. 82. P. 804.

8. *Grillner S.* Neural networks for vertebrate locomotion // *Scientific American.* 1996. P. 64.

9. *Ekeberg Ö.* A combined neuronal and mechanical model of fish swimming // *Biol. Cybern.* 1993. Vol. 69. P. 363.

10. *Ekeberg Ö., Lansner A., Grillner S.* The neural control of fish swimming studied through numerical simulations // *Adaptive Behavior.* Massach. Inst. Technol., USA. 1995. Vol. 3, № 4. P. 363.

11. *Arena P., Fortuna L., Branciforte L.* Reaction-diffusion CNN algorithms to generate and control artificial locomotion // *IEEE Trans. Circuits and Systems.* 1999. Vol. 46, № 2. P. 253.

12. *Symbalyuk G.S., Borisyuk R.M., Müller-Wilm U., Cruse H.* Oscillatory network controlling six-legged locomotion. Optimization of model parameters // *Neural Networks.* 1998. Vol. 11. P. 1449.

13. *Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И., Сельверстон А., Баженов М.В., Хуэрта Р., Сущик М.М., Рубчинский Л.Л.* Синхронизация в нейронных ансамблях // *УФН.* 1996. Т. 166, № 4.

14. *Борисюк Г.М., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Лузянина Т.Б., Турова Т.С., Цымбалюк Г.С.* Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения // *Математическое моделирование.* 1992. Т. 4, № 12, С. 3.

15. *Cruse H.* What mechanisms coordinate leg movement in walking arthropods? // *Trends in Neurosciences.* 1990. Vol. 13, № 1. P. 15.

16. *Андронов А.А., Витт, А.А., Хайкин, С.Э.* Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 916 с.

17. *Nekorkin V.I., Makarov V.A., Kazantsev V.B., Velarde M.G.* Spatial disorder and pattern formation in lattices of coupled bistable systems // *Physica D.* 1997. Vol. 100. P. 330.

18. *Казанцев В.Б., Некоркин В.И., Веларде М.Г.* Модель нейрона с осцилляторной активностью ниже порога возбуждения // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1998. Т. XLI, № 12. С. 1623.

19. *Nekorkin V.I., Kazantsev V.B., Velarde M.G.* Spike-burst and other oscillations in a system composed of two coupled, drastically different elements // *Eur. Phys. J. B.* 2000. Vol. 16 P. 147.

20. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991.

*Нижегородский государственный  
университет*

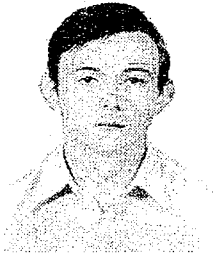
*Поступила в редакцию 21.04.01*

## **PRINCIPLES OF CONTROL AND COORDINATION OF MOVEMENT BASING ON NEURO-DYNAMICS**

*V.B. Kazantsev, V.I. Nekorkin*

Some principles of control and coordination of movement basing on central nervous system dynamics are considered. Using neurobiological view of the problem and nonlinear dynamics theory a new architecture of movement control and «fine tuning» is

presented. It includes discrete control block mimicing functions of the olivo-cerebellar circuit in central nervous system of humans and animals. For illustration, we apply the principles to the control of simplest locomotion of a hexapod robot prototype.



*Виктор Борисович Казанцев* – родился в Дзержинске, Нижегородской области (1973). Окончил радиофизический факультет ННГУ (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1999). В настоящее время является старшим преподавателем кафедры теории колебаний радиофизического факультета ННГУ. Область его научных интересов – теория колебаний и волн, нелинейная динамика дискретных сред, нейродинамика. Имеет более 40 научных публикаций.



*Владимир Исаакович Некоркин* – родился на Украине (1948), окончил радиофизический факультет ННГУ (1971). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1981, ННГУ) и доктора физико-математических наук (1992, СГУ). С 1971 года работал в Нижегородском институте прикладной математики, с 1983 по 1986 – в Нижегородском политехническом институте, с 1986 года по настоящее время работает на радиофизическом факультете ННГУ, профессор. Область научных интересов – теория колебаний и волн, структурообразование и нелинейные волны в непрерывных и дискретных средах, синхронизация и пространственно-временной хаос. Имеет более 100 научных публикаций в указанных направлениях, соавтор двух монографий. В качестве приглашенного профессора читал лекции в Мадридском и Стэнфордском университетах. Работал в Калифорнийском университете.