



## Управление моторными ритмами

*Николай Ильич Базенков, к.т.н.*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

*Летняя школа РАИИ, 5-18 июля 2021 г.*

# Содержание

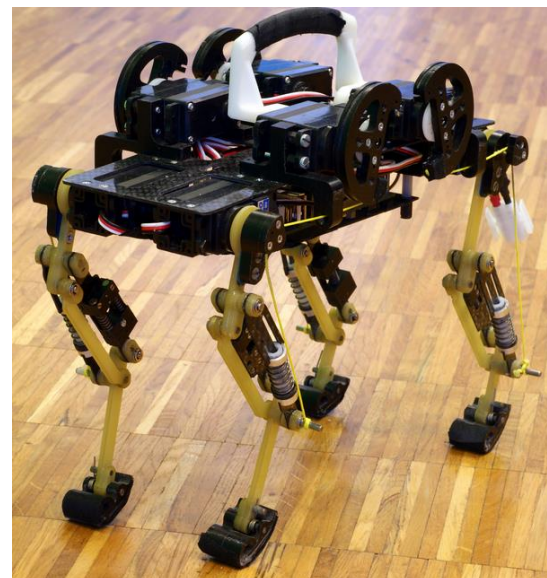
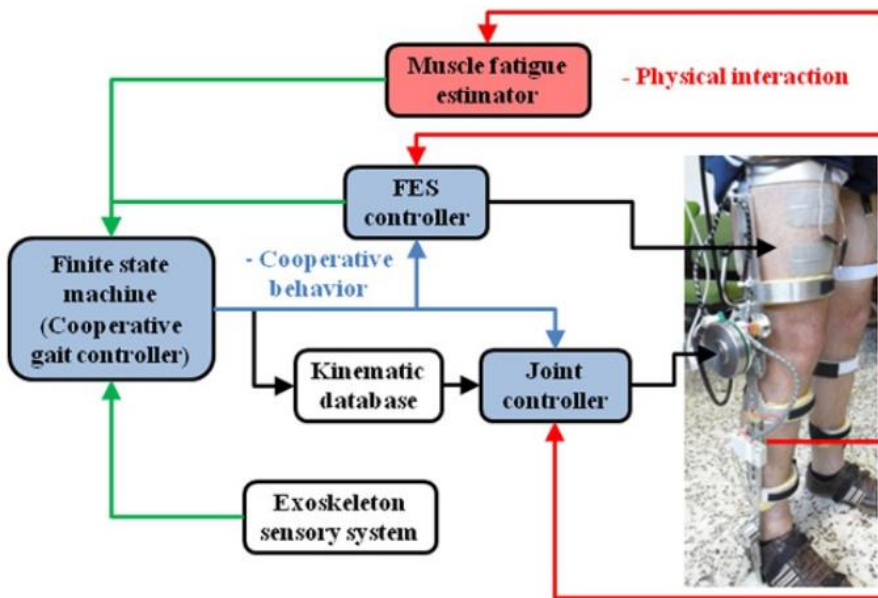
1. Управление движениями в нервной системе
2. Моторные ритмы
3. Центральные генераторы паттернов (ЦГП)
4. Нейроморфное управление
5. Нейромодуляция

# Управление движениями

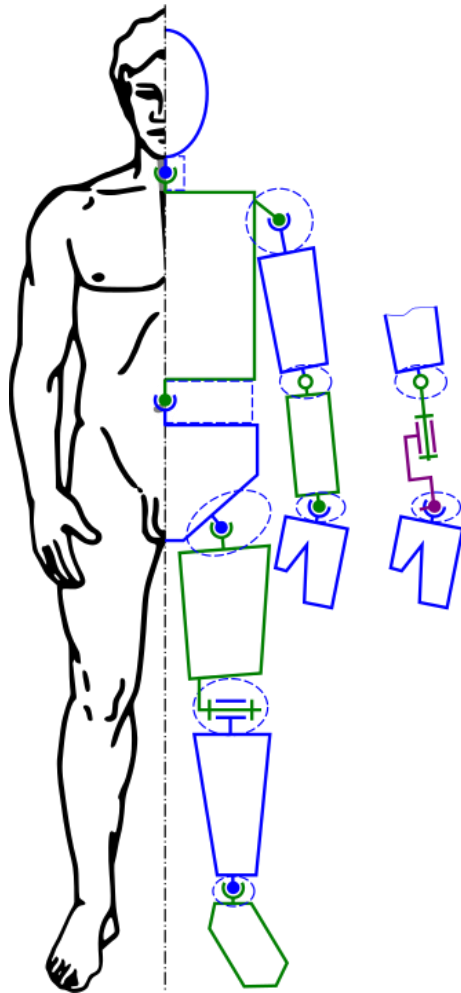


# Приложения

1. Медицина: реабилитация, протезирование, диагностика
2. Робототехника
3. Имитация движений в играх, 3d моделировании и др.



# Проблема степеней свободы



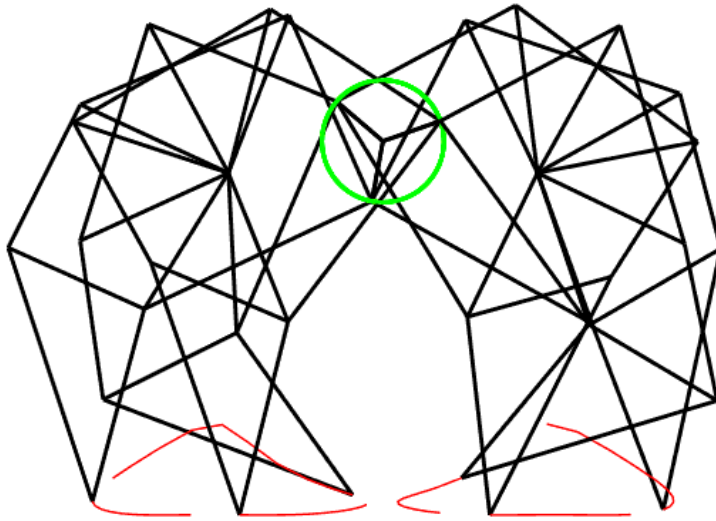
Человеческое тело имеет избыточные степени свободы на всех уровнях:

1. **Анатомическом** – в мышцах и суставах
2. **Кинематическом** – действия могут следовать по разным траекториям с разной скоростью, но достигнуть одной и той же цели
3. **Нейрофизиологическом** – мышца может активироваться разными группами мотонейронов, которые могут активироваться разными сигналами от ЦНС

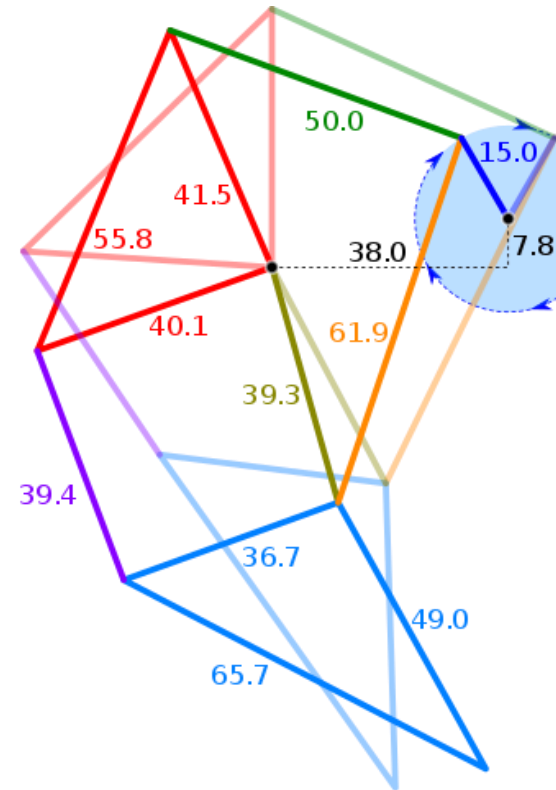
[https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees\\_of\\_freedom\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_problem)

# Отличие от инженерных систем

Механические системы, даже сложные, обычно имеют немного степеней свободы.



1 DOF



[https://en.wikipedia.org/wiki/Jansen%27s\\_linkage](https://en.wikipedia.org/wiki/Jansen%27s_linkage)



# Стереотипные и свободные движения

Стереотипные (ритмические) движения: сердечный ритм, дыхание, ходьба, бег

Свободные (voluntary) движения: взять чашку со стола, ударить по мячу



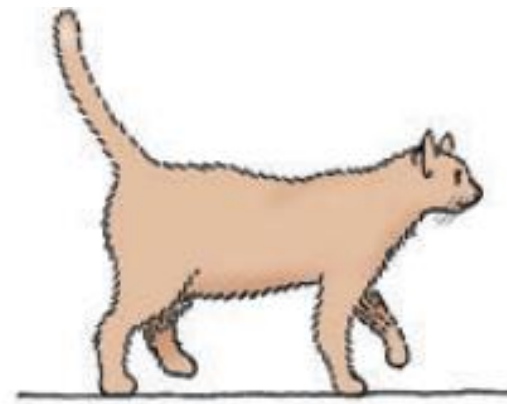
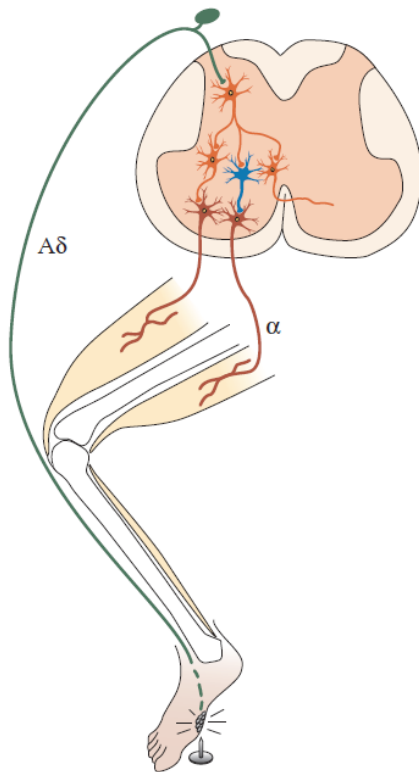




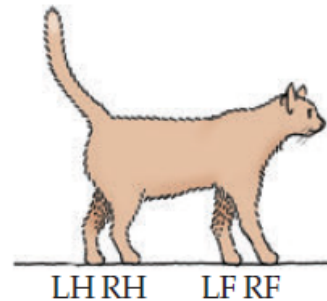
# Возникновение движений

Рефлексы. Возникают как реакция на внешний стимул: боль, свет и др.

Эндогенная генерация. Не требует внешнего стимула.



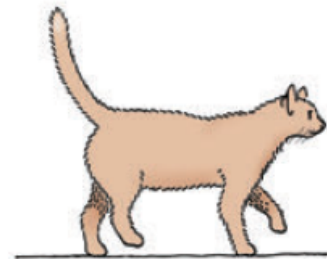
# Локомоция



Walk



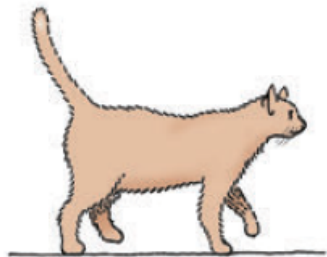
Limbs move  
in sequence  
LH → LF → RH → RF



Trot



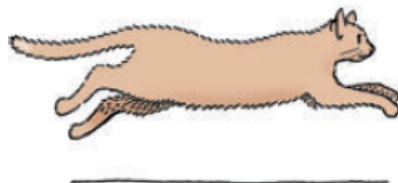
Two opposite legs  
on ground (LH, RF)  
and off ground  
(LF, RH)



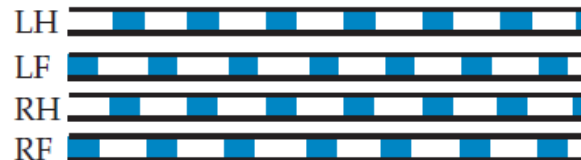
Pace



Both legs on same  
side on ground  
or off ground



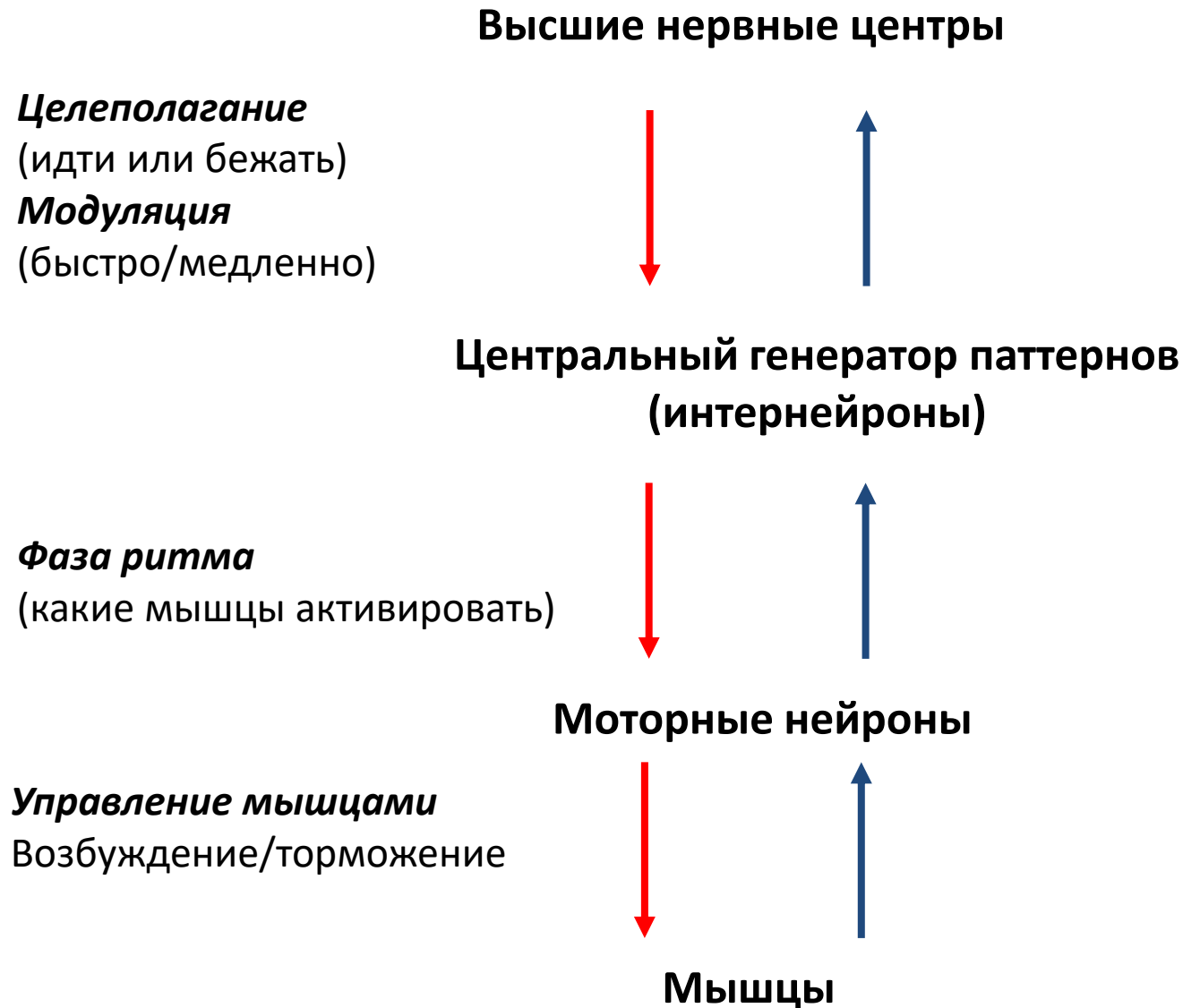
Gallop



Both hind legs or  
both front legs off  
ground, or all  
four legs briefly

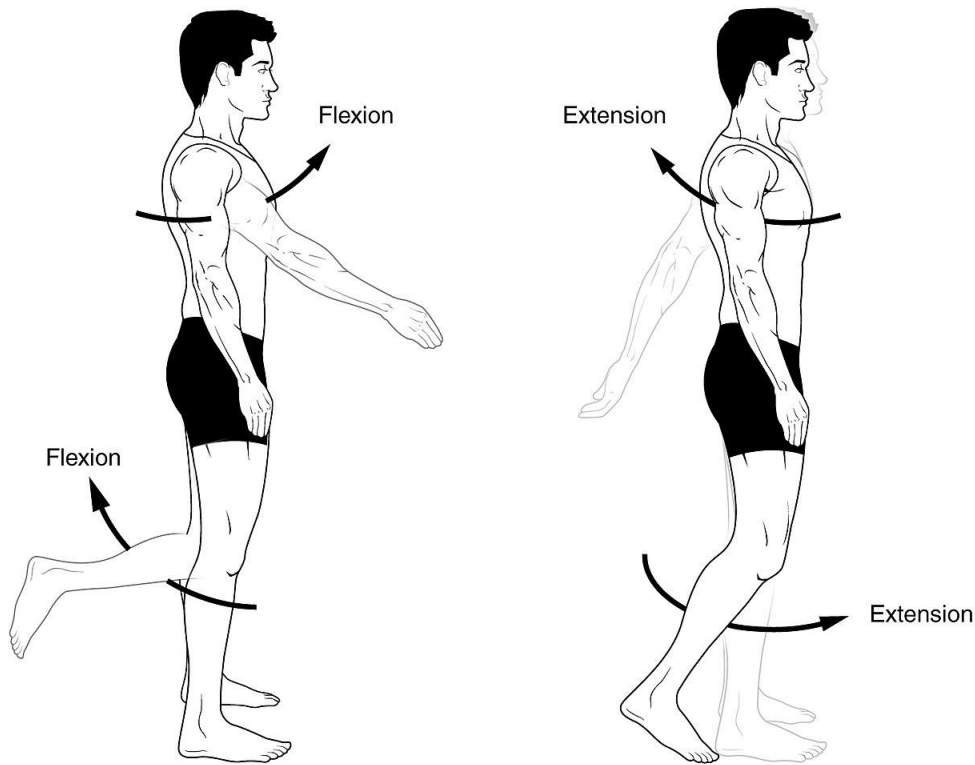
Time →

# Управление локомоцией

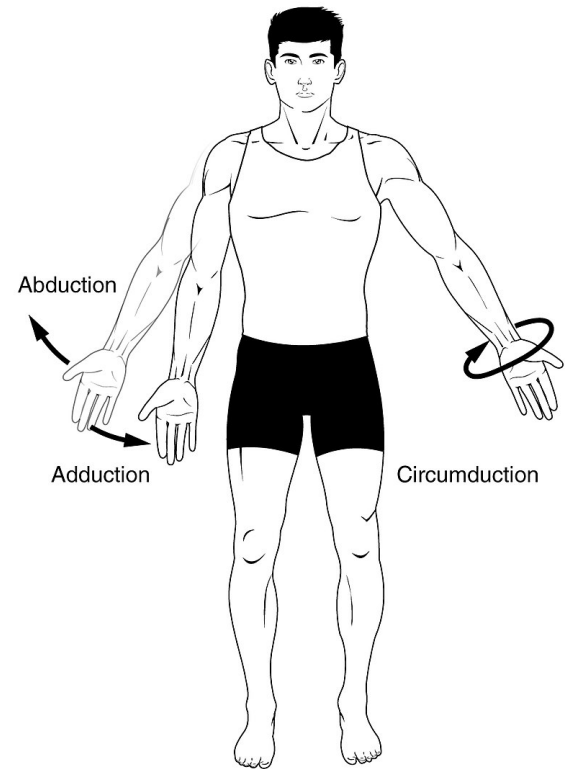


# Мышцы

Движения конечностей управляются антагонистическими группами мышц (флексор/экстенсор, абдуктор/аддуктор)



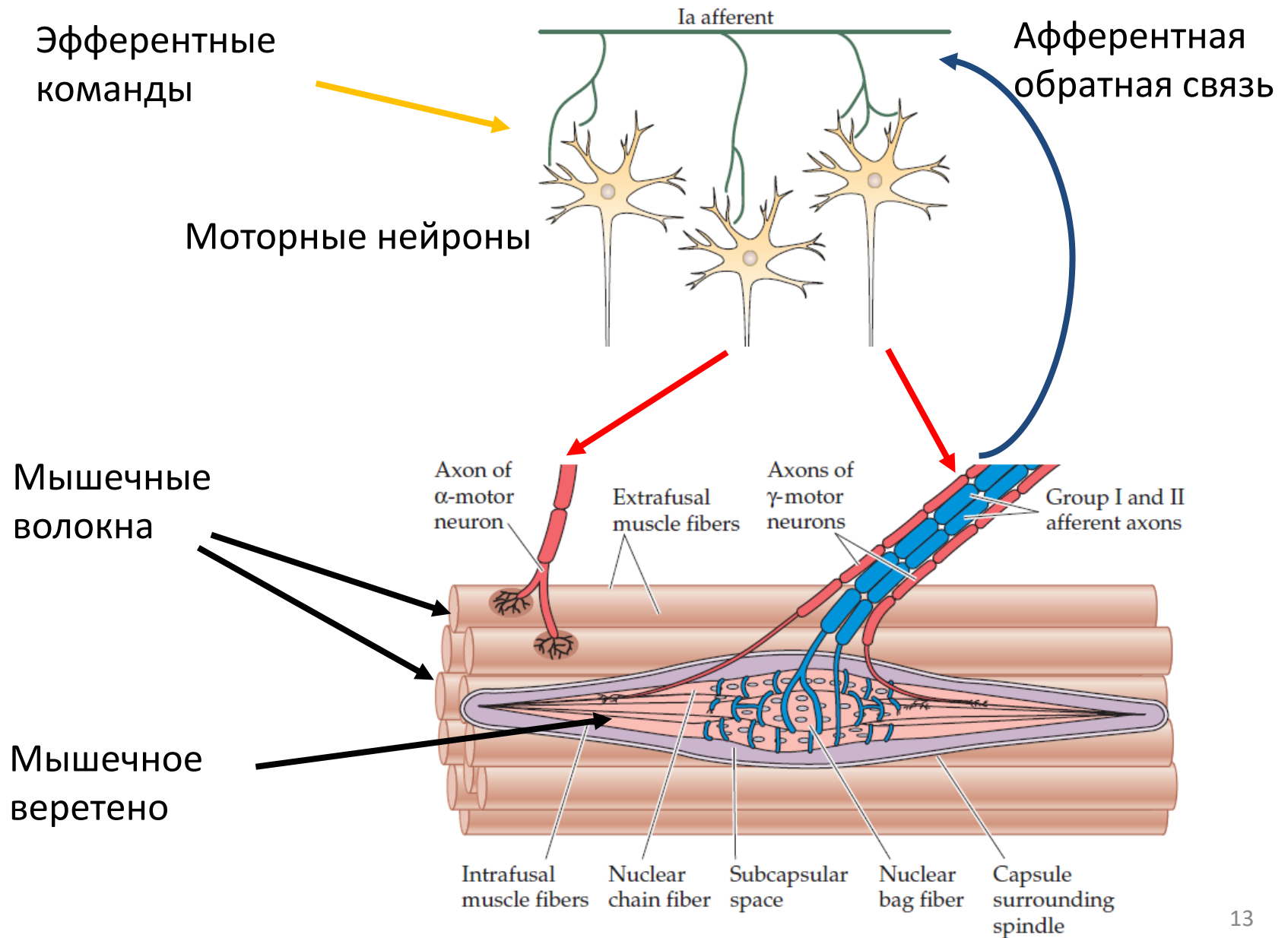
(a) and (b) Angular movements: flexion and extension at the shoulder and knees



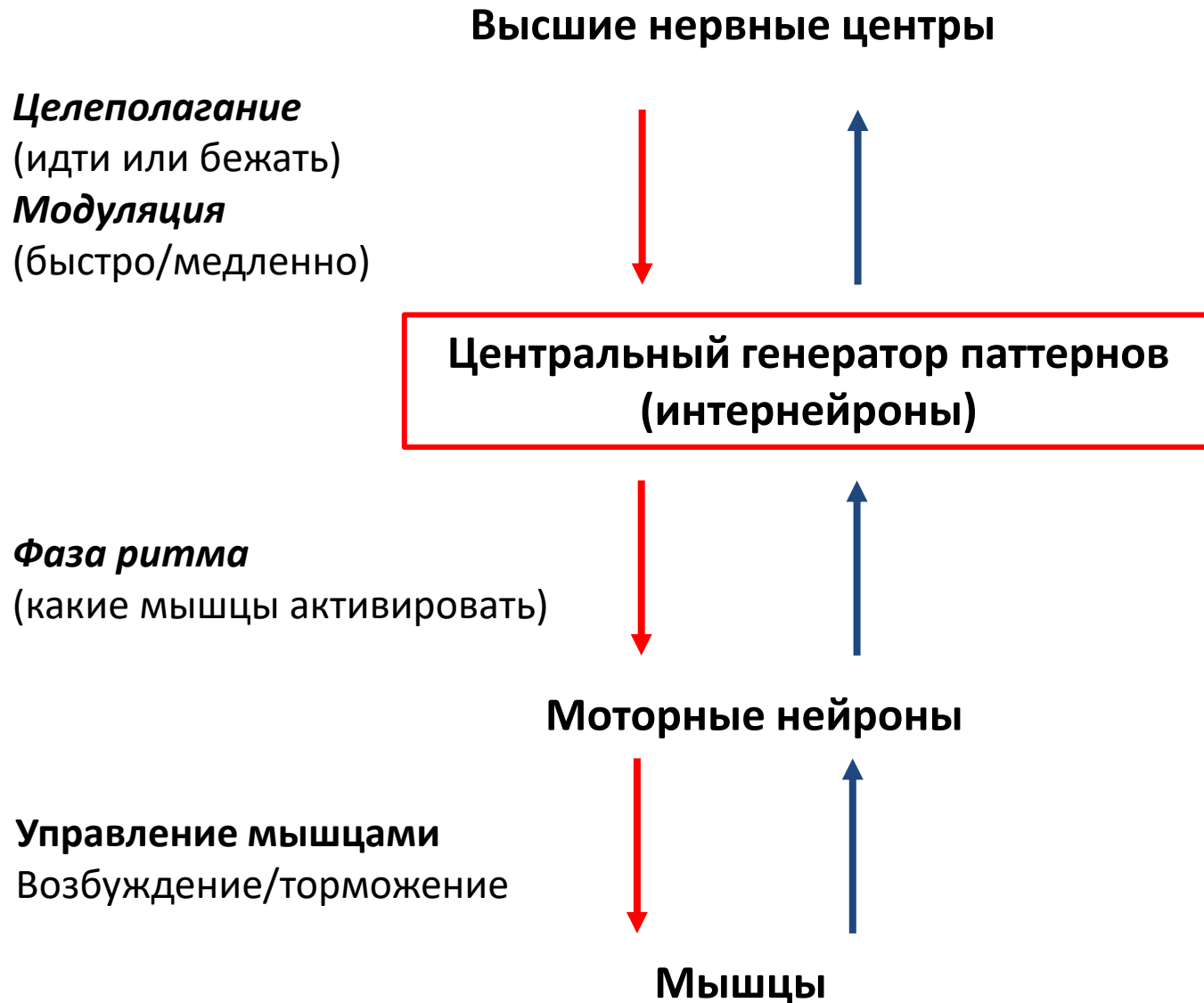
(e) Angular movements: abduction, adduction, and circumduction of the upper limb at the shoulder

(f)

# Управление мышцами



# Управление локомоцией



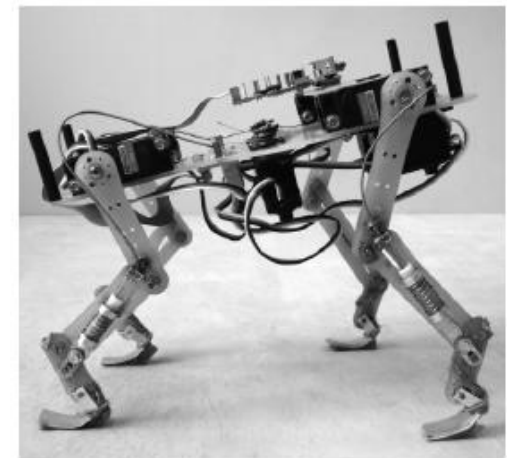
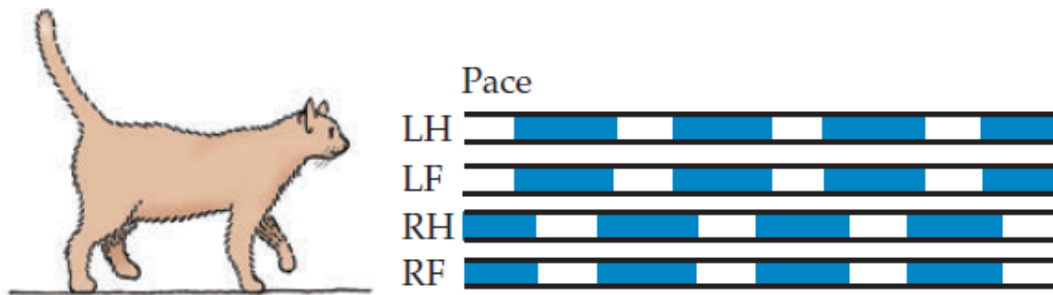


# Центральные генераторы паттернов

Сети нейронов, способные генерировать упорядоченную активность в отсутствие внешних воздействий

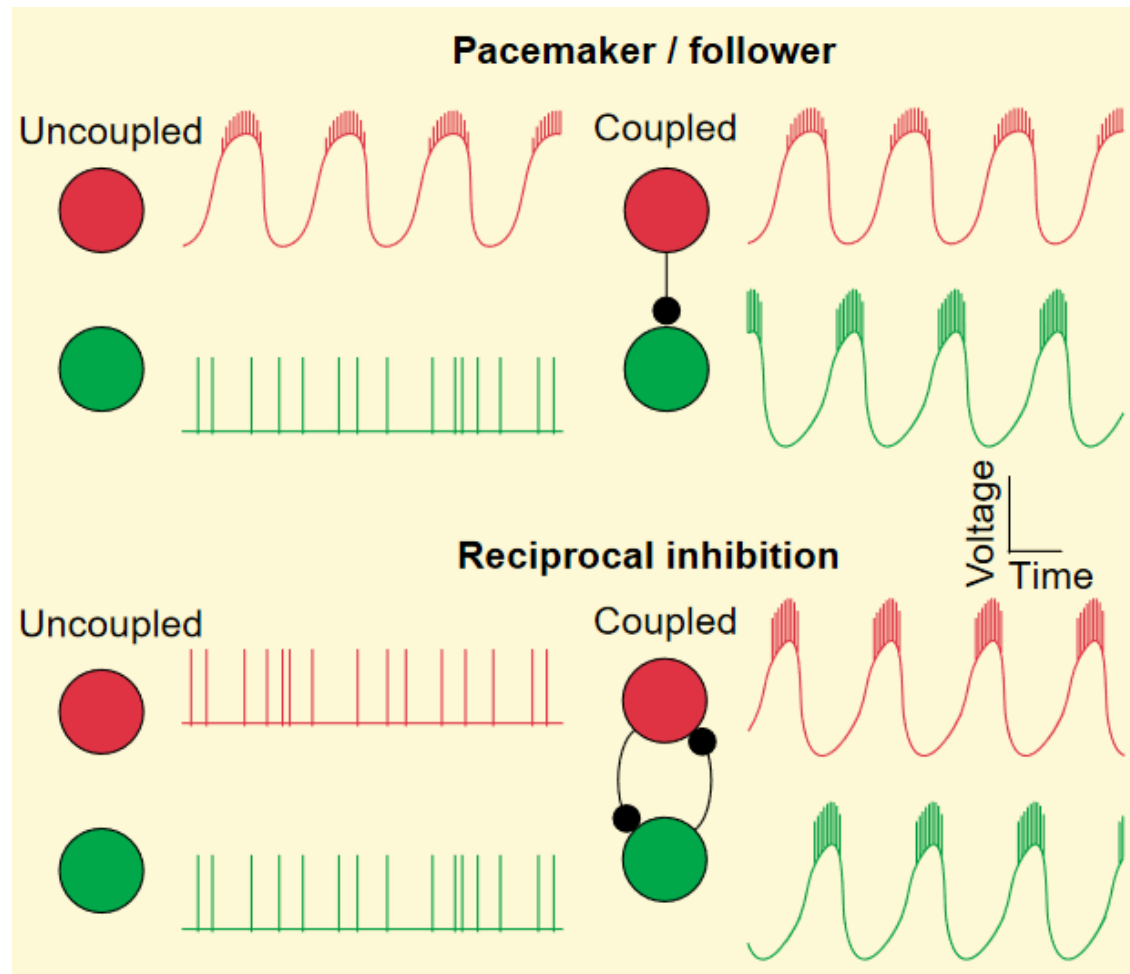
ЦГП участвуют в генерации как простых физиологических ритмов (дыхание), так и сложных движений (локомоция, пение птиц)

Искусственные ЦГП используются в робототехнике



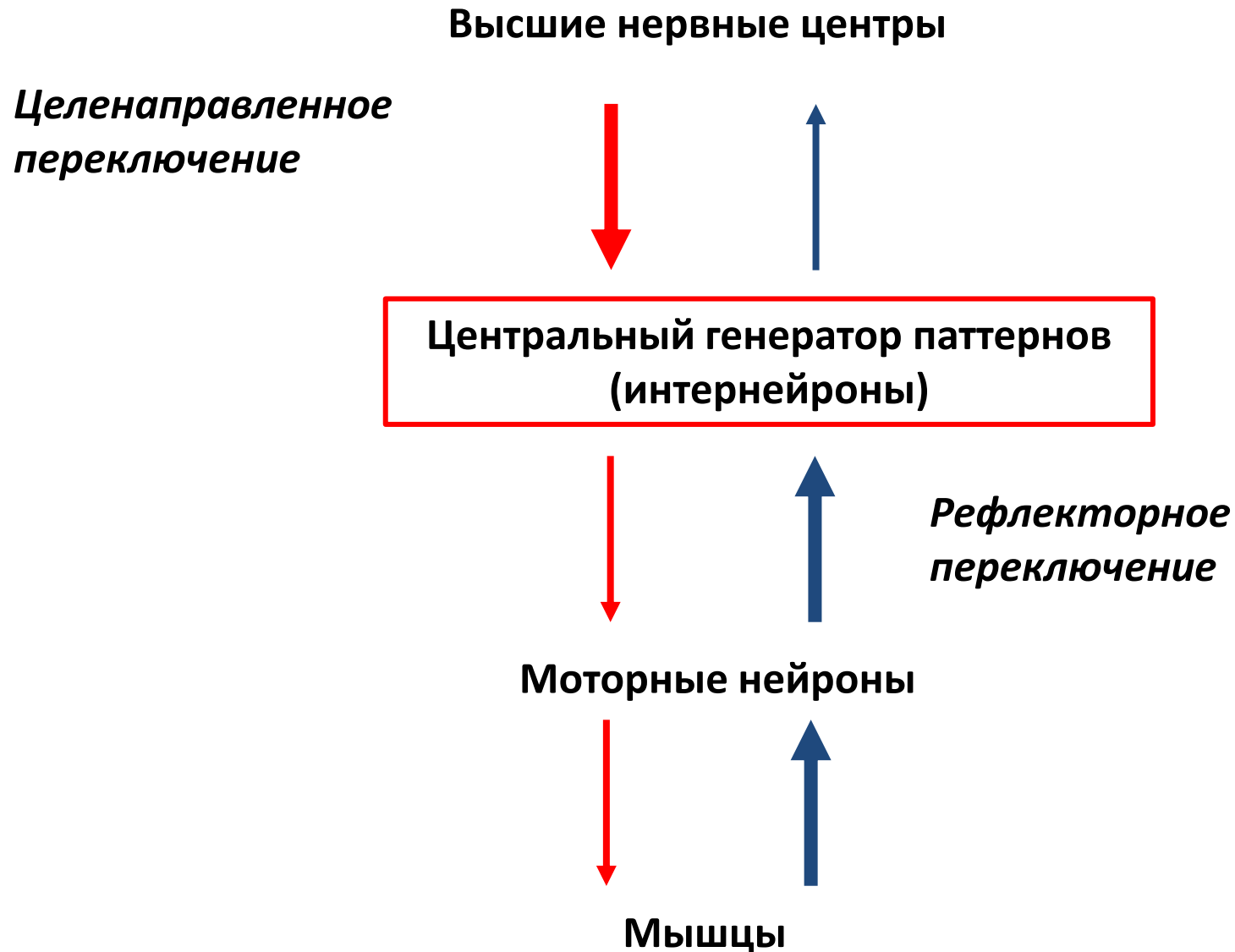
Ijspeert, A. J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. *Neural networks*, 21(4), 642-653.

# Механизмы возникновения ритма



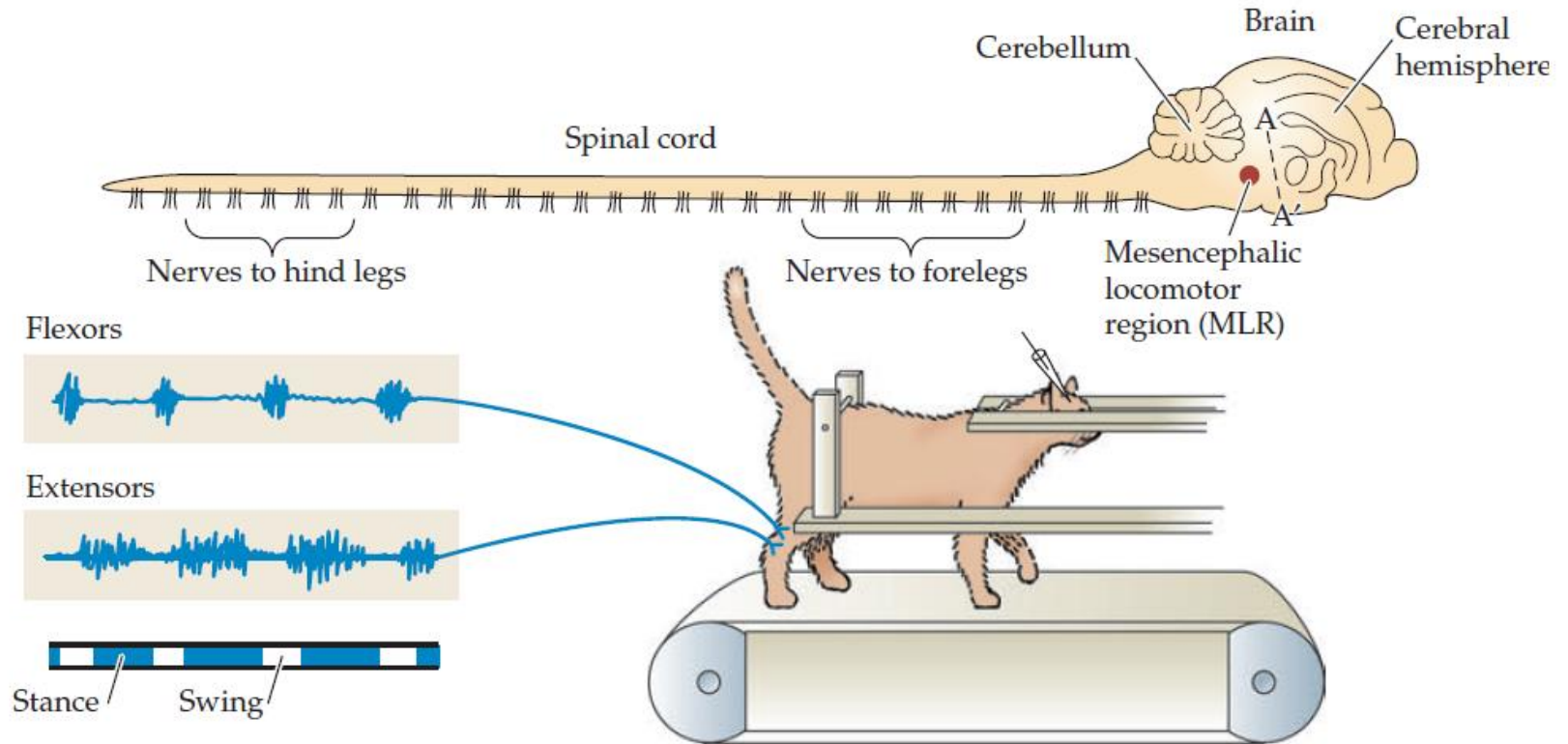
Marder, E., Bucher, D. (2001) Central pattern generators and the control of rhythmic movements, *Current Biology*, Vol. 11, Issue 23, pp. R986–R996, 2001

# Механизмы переключения ритма



# Рефлекторная локомоция

Локомоторный ритм может запускаться сигналами от моторных нейронов



# Общие черты локомоторных ЦГП

1. **Эндогенная активность.** Внешние команды могут активировать ритм, но фазы генерируются нейронами ЦГП
2. **Группы антагонистических нейронов.** Координация обеспечивается взаимным торможением.
3. **Сенсорная обратная связь.** Как от моторных нейронов и мышц, так и от высших центров
4. **Модулирующие управляющие воздействия.** Управляют скоростью и другими характеристиками ритма. Участвуют в смене ритма.

# Нейроморфное управление

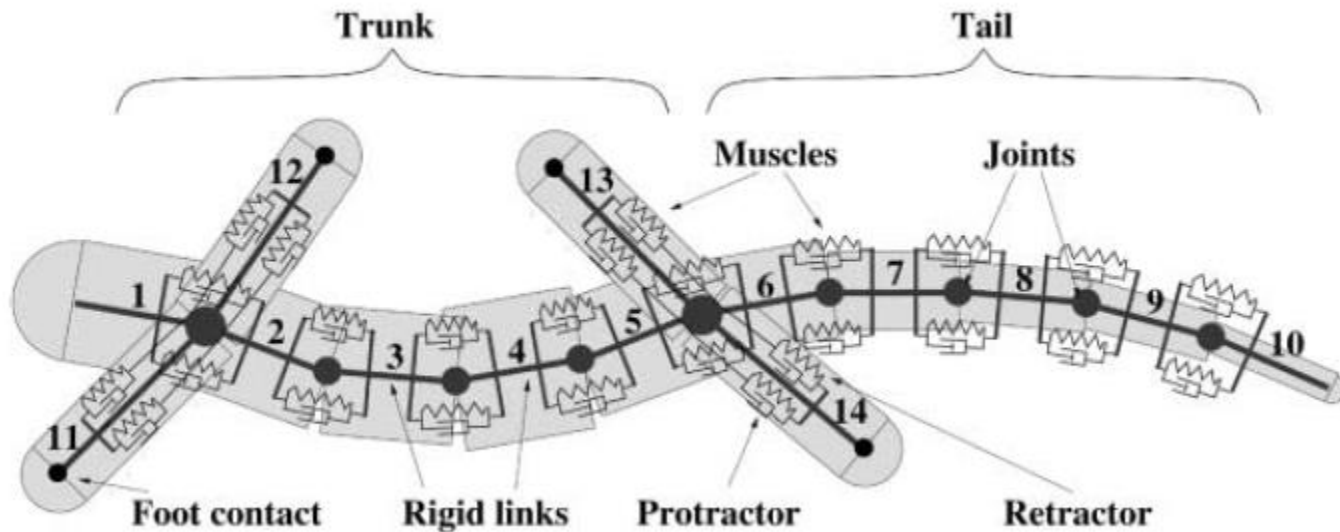


Ijspeert, A. J. (2001). A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological cybernetics*, 84(5), 331-348.

Knüsel, J., et.al.. (2020). Reproducing five motor behaviors in a salamander robot with virtual muscles and a distributed CPG controller regulated by drive signals and proprioceptive feedback. *Frontiers in neurorobotics*, 14.

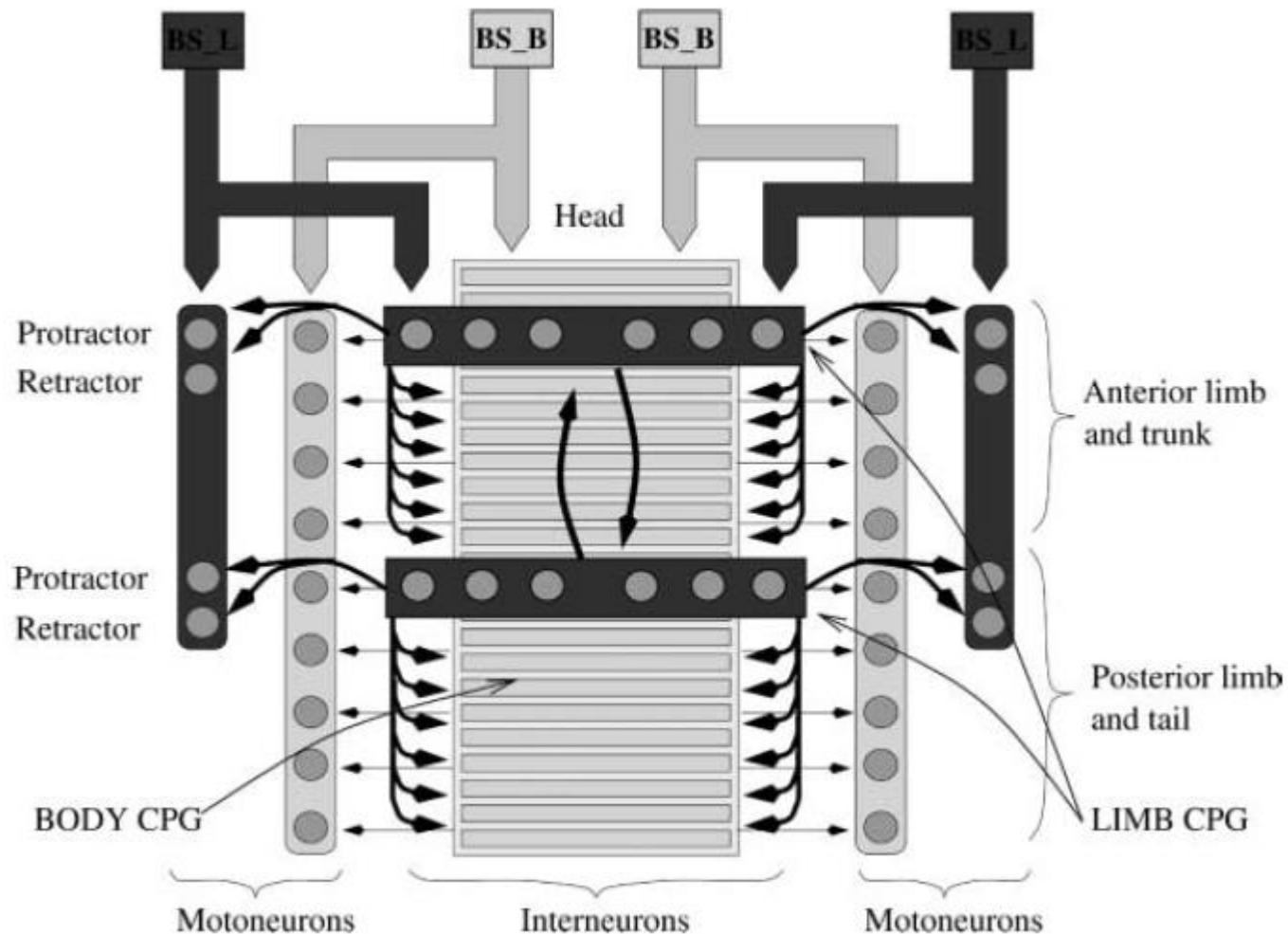


# Модель саламандры



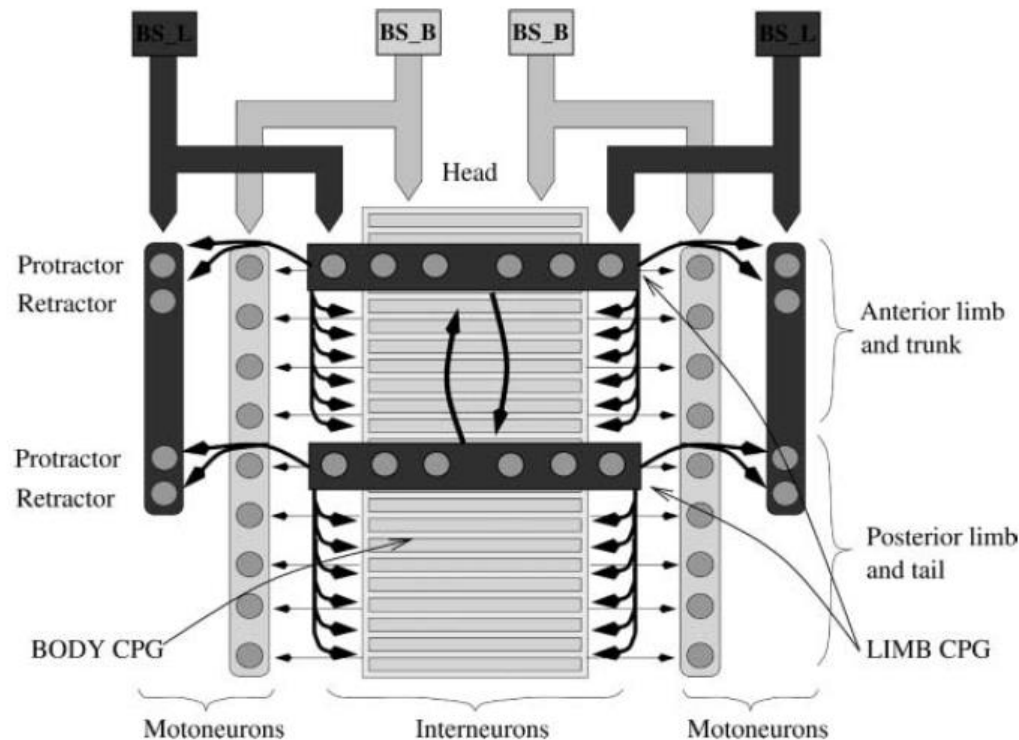
Ijspeert, A. J. (2001). A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological cybernetics*, 84(5), 331-348.

# Архитектура сети

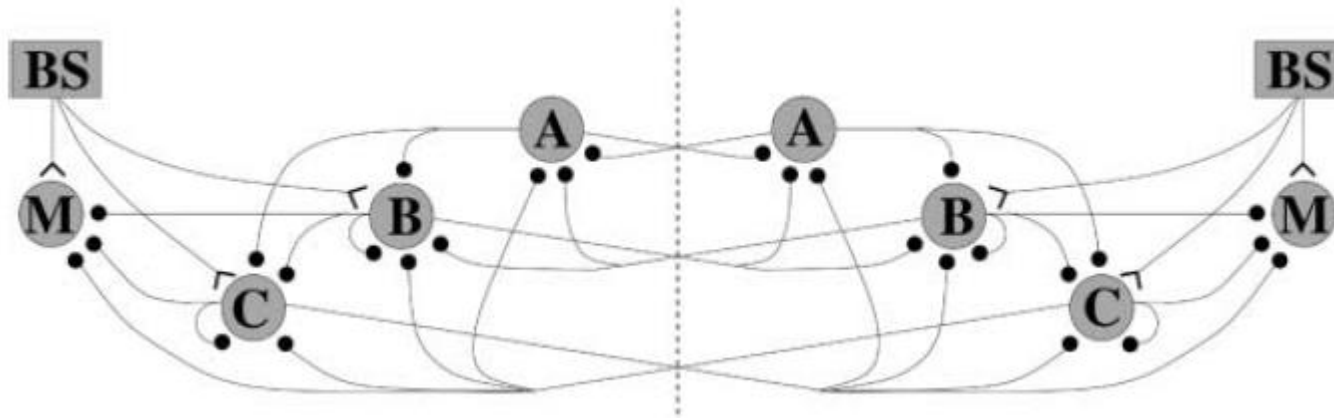


# Подбор параметров

1. Настройка связей внутри сегмента тела ( Body CPG)
2. Настройка связей между сегментами
3. Настройка связей в CPG конечностей (Limb CPG)



# Сеть одного сегмента

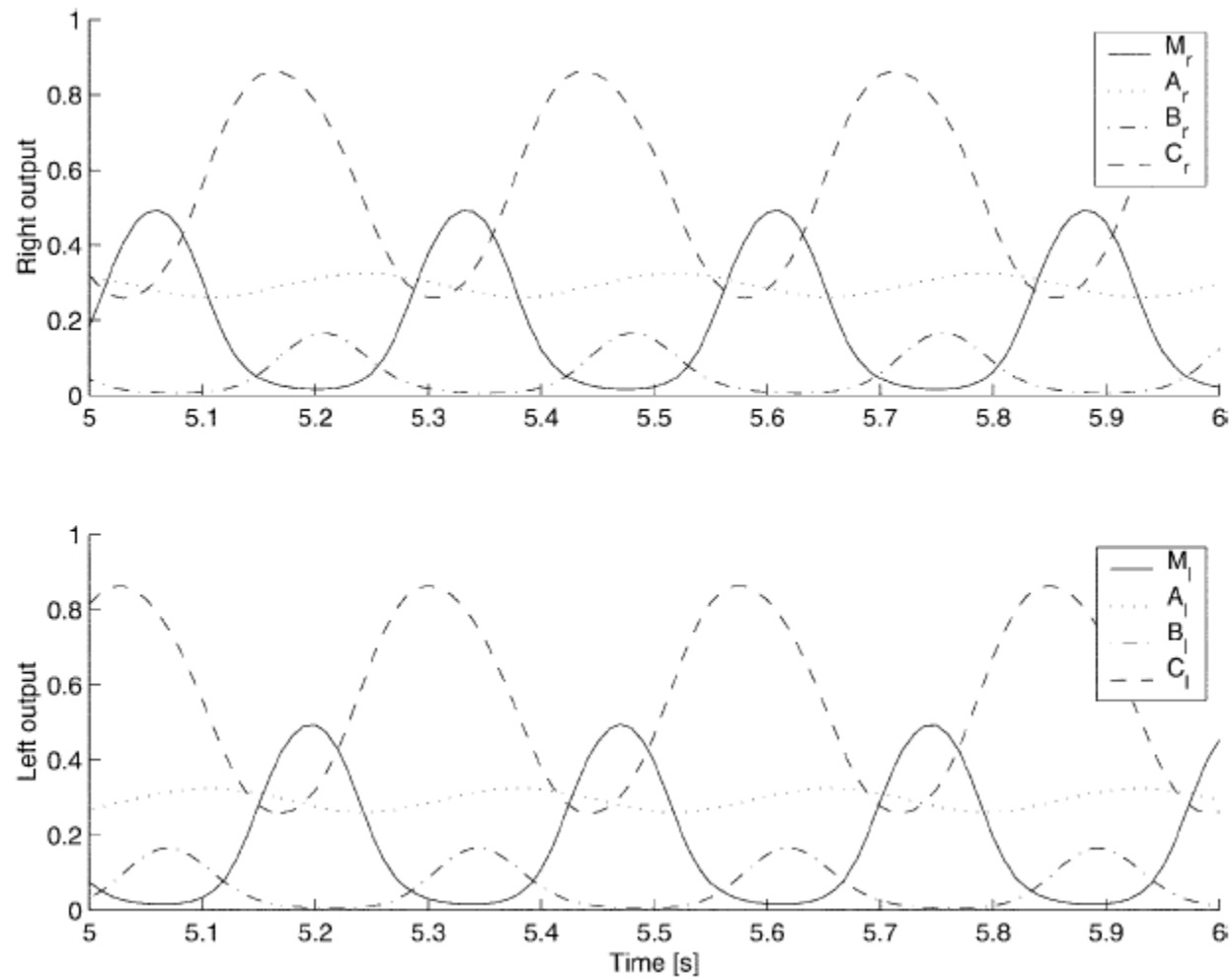


BS – входы от «мозга». Обеспечивают тоническое воздействие

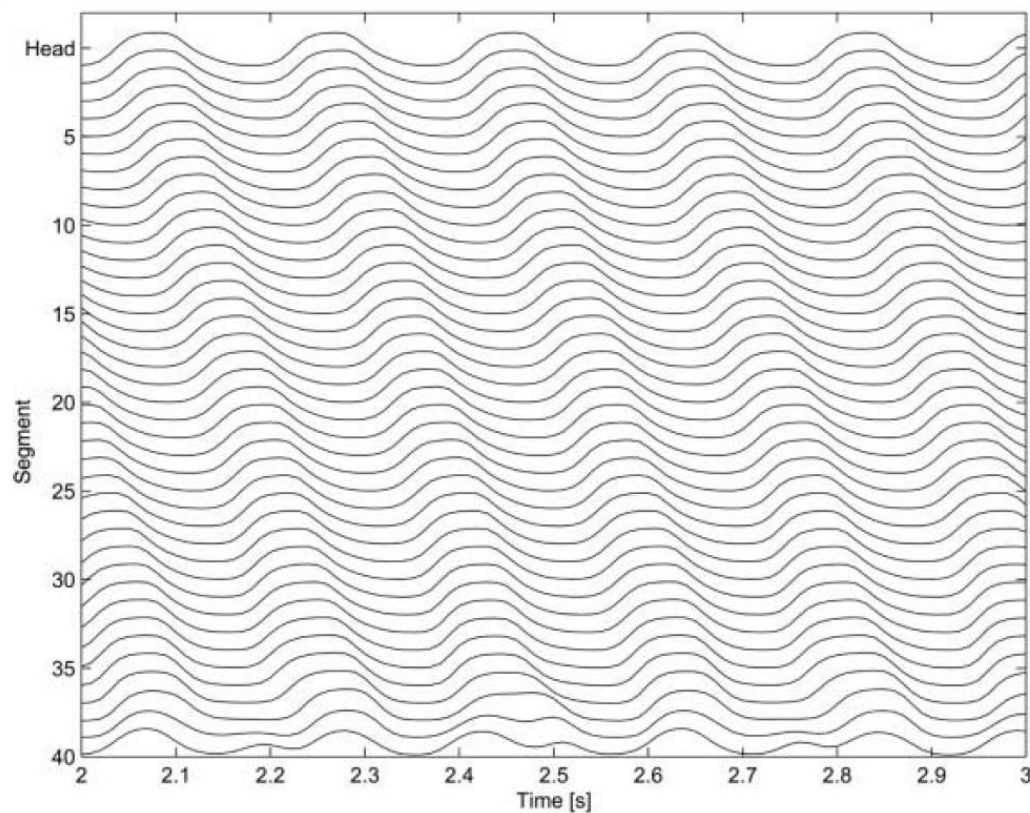
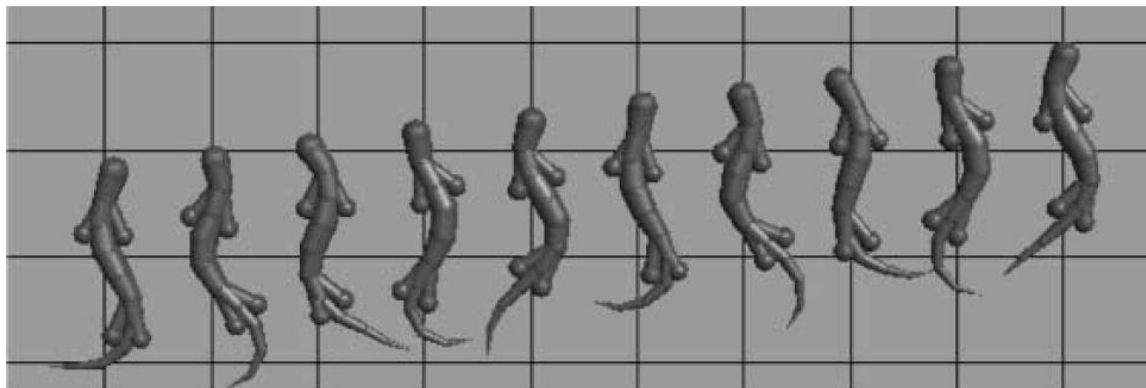
A, B, C – интернейроны. Генерируют ритм

M – мотонейроны. Управляют мышцами

# Активность в сегменте

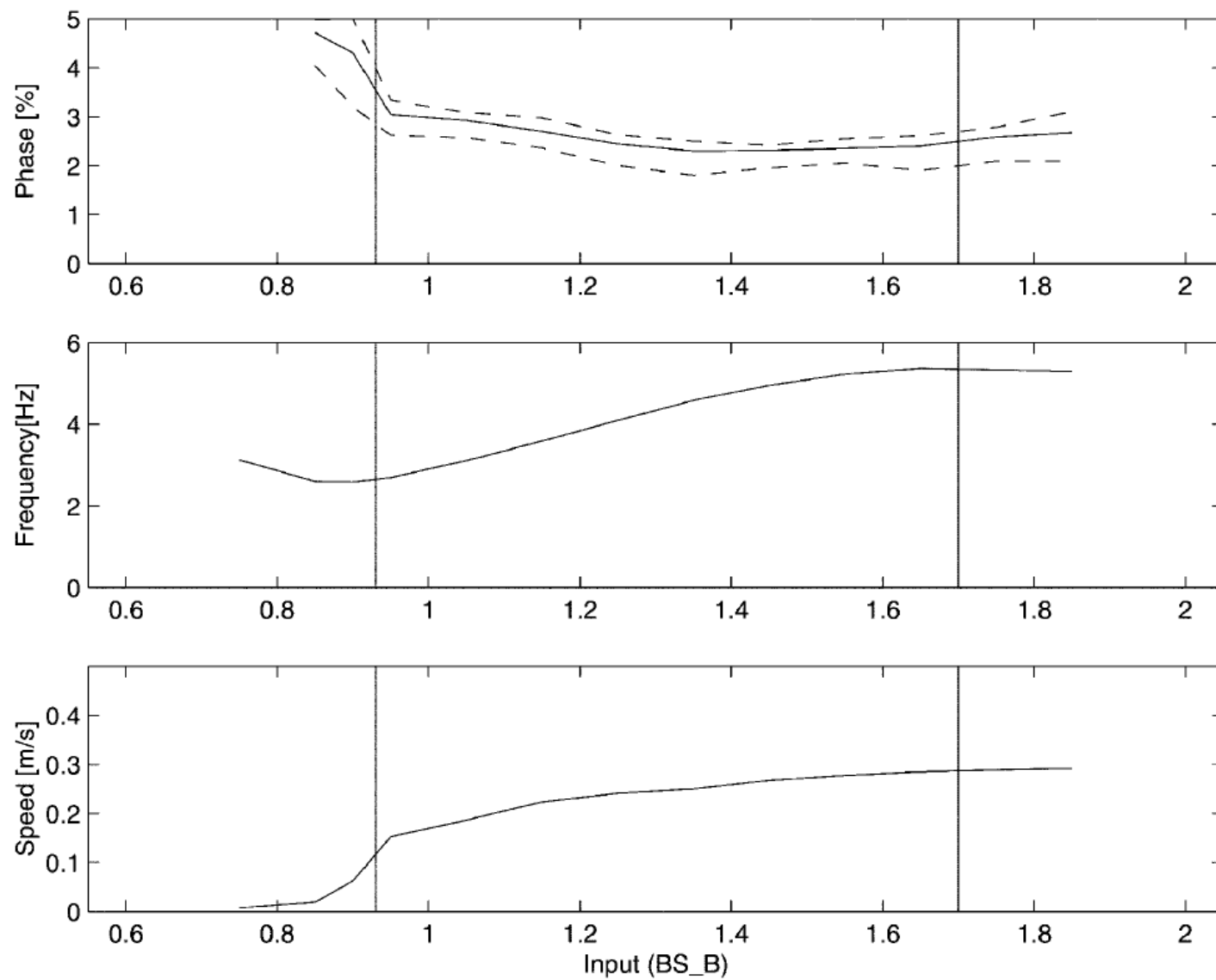


# Ритм 1. Плавание

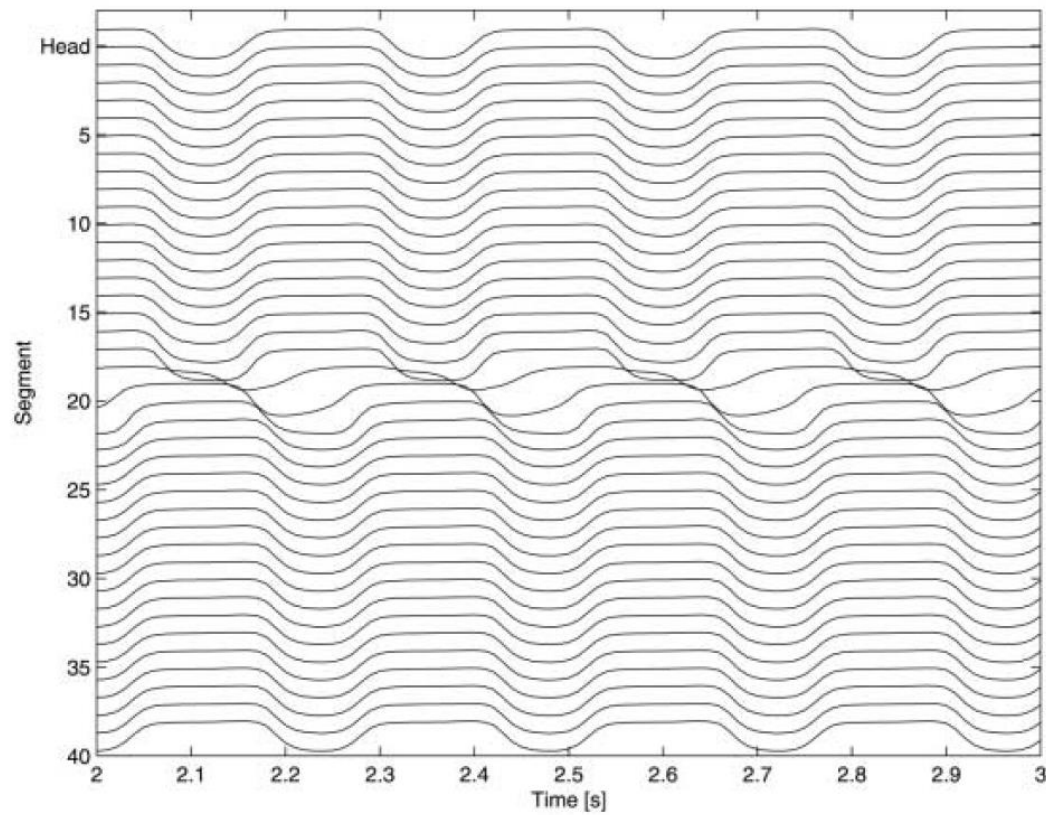
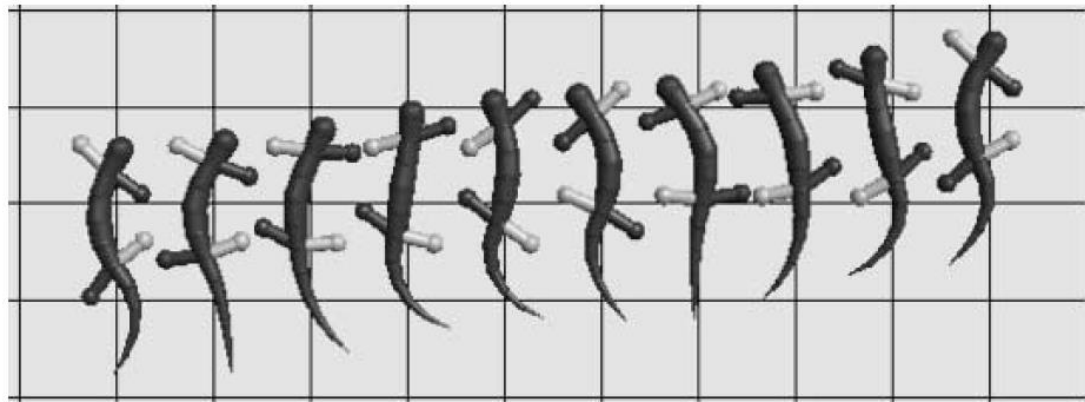




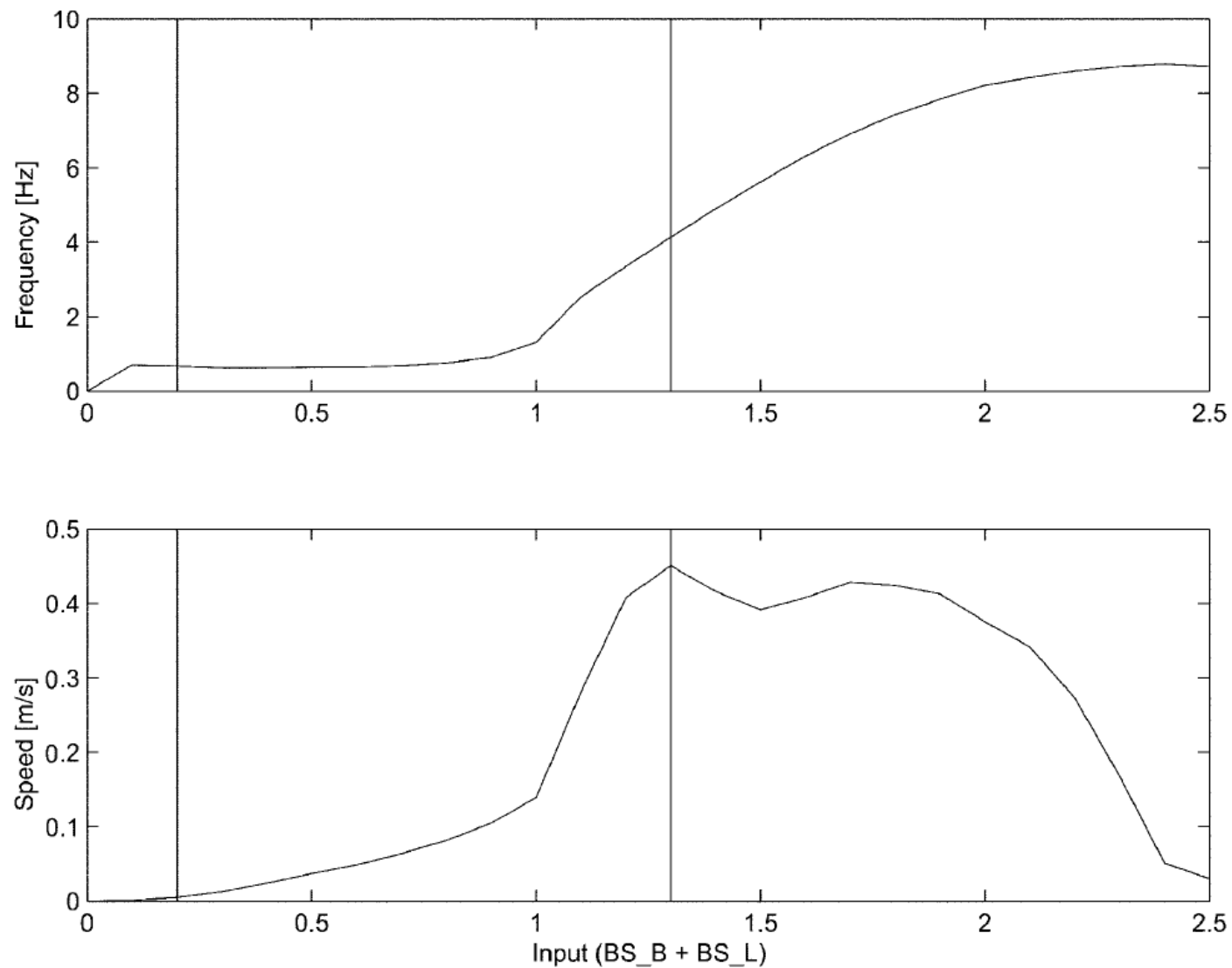
# Ритм 1. Изменение скорости и частоты



## Ритм 2. Ходьба по суше

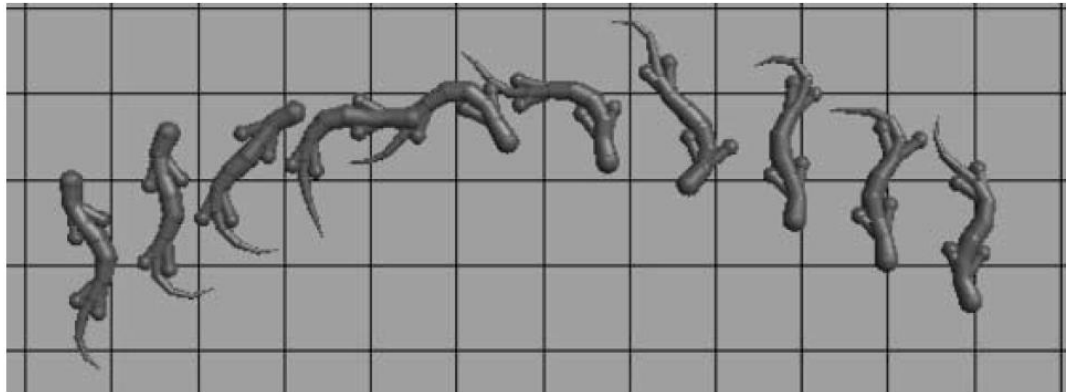


## Ритм 2. Изменение скорости и частоты

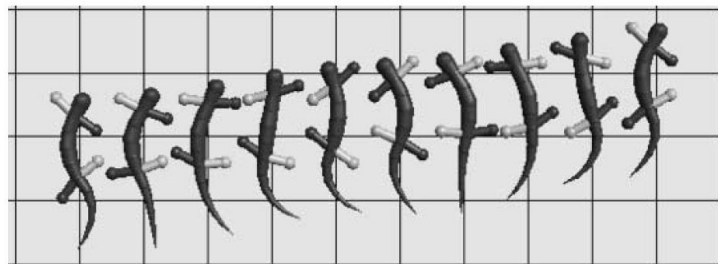
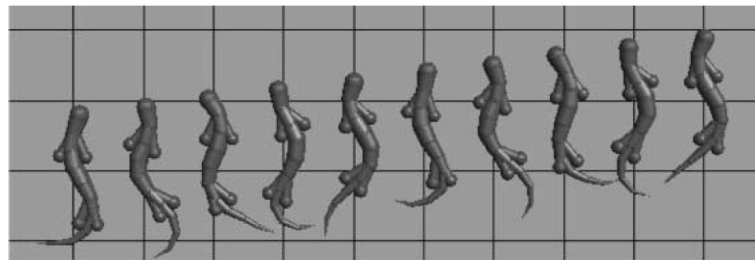
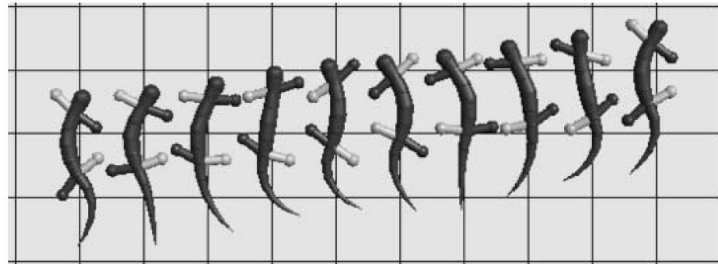


# Поворот

Если приложить асимметричный тонический вход к левой и правой части, саламандра поворачивает

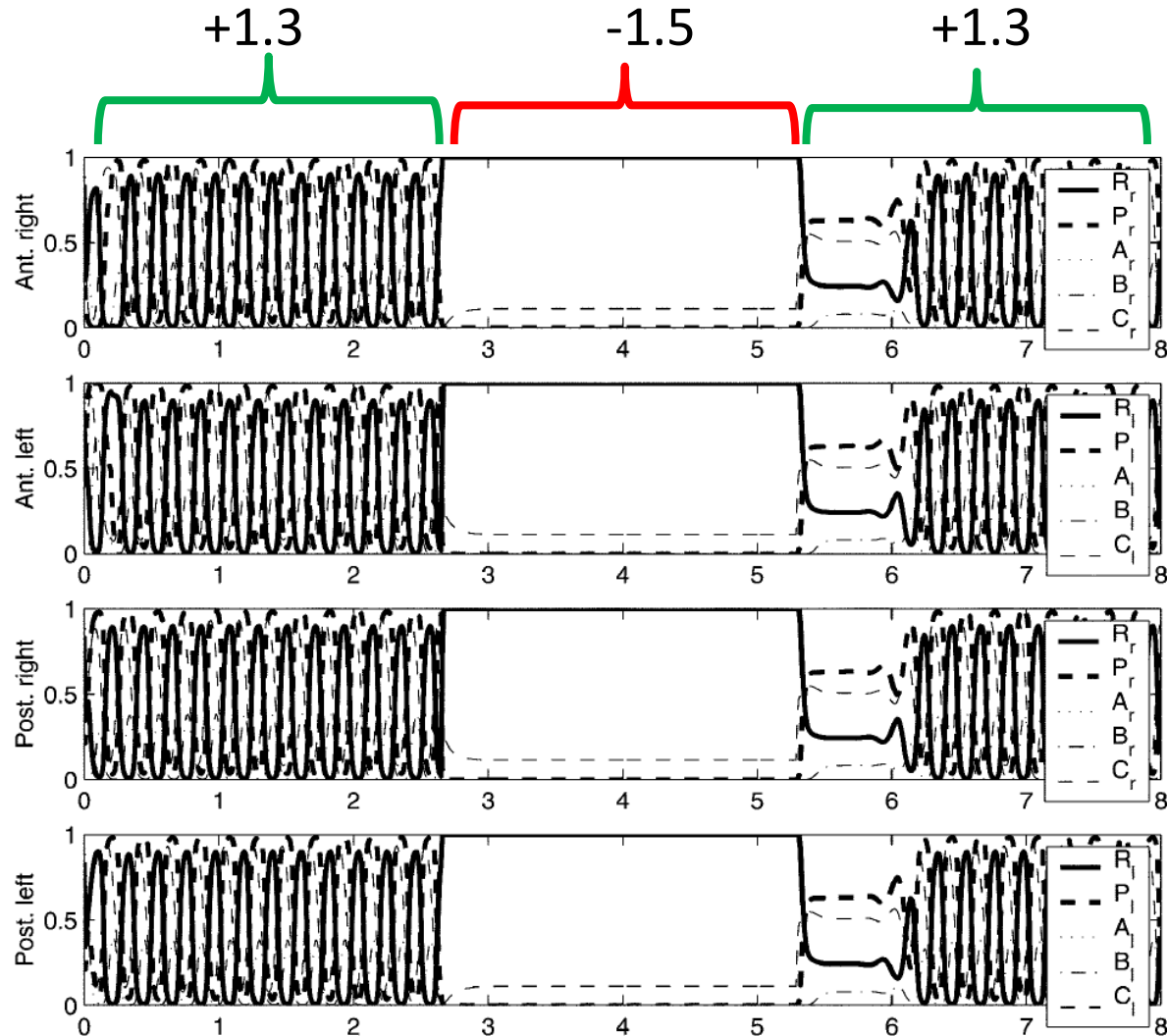


# Переключение ритма



# Переключение ритма

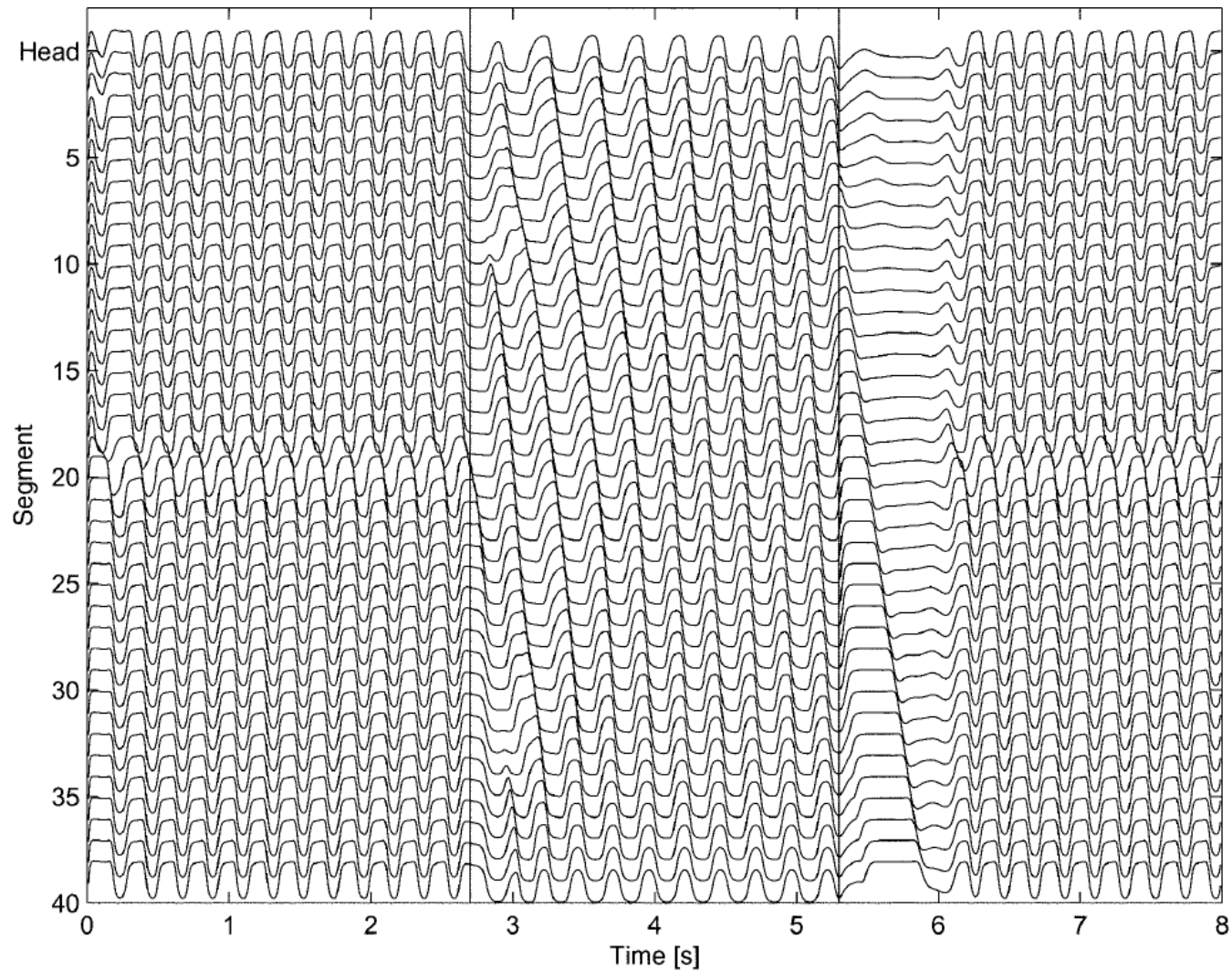
Тонический вход на CPG конечностей:



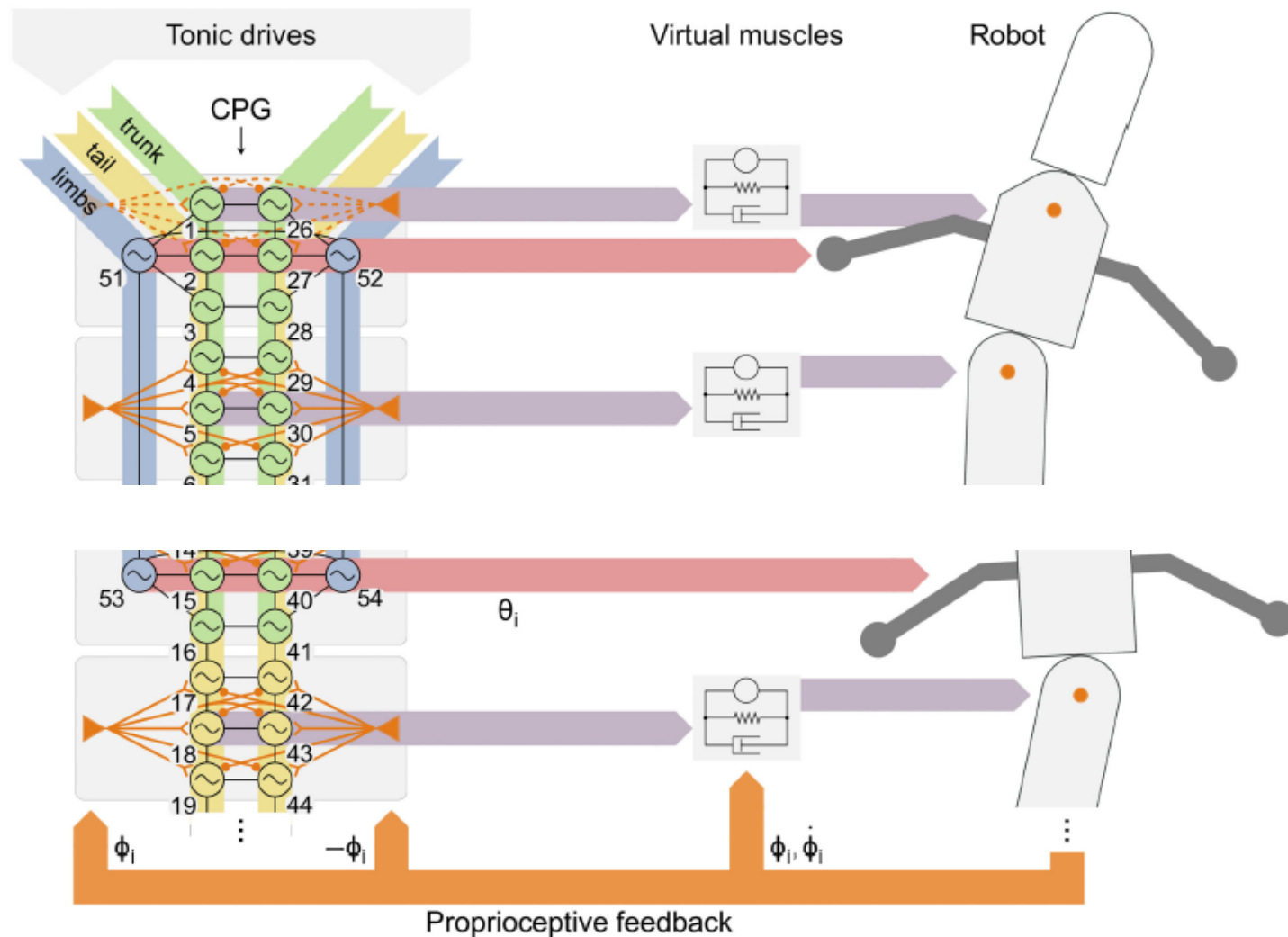


# Переключение ритма

CPG тела получает постоянный тонический вход +1.3

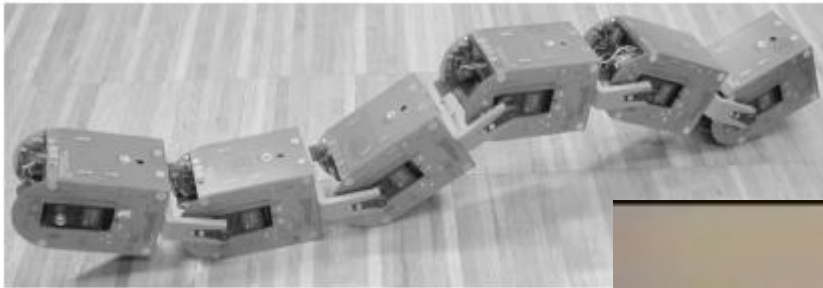


# Развитие «саламандры»



Knüsel, J., et.al.. (2020). Reproducing five motor behaviors in a salamander robot with virtual muscles and a distributed CPG controller regulated by drive signals and proprioceptive feedback. *Frontiers in neurorobotics*, 14.

# Модульные роботы



**Dynamic Locomotion Group**

<https://www.youtube.com/channel/UCuL-Pnlqf4ZsAO1qV99ohwA>

# Четырехногий робот

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \alpha(\mu - r_i^2)x_i - \omega_i y_i \\ \dot{y}_i &= \beta(\mu - r_i^2)y_i + \omega_i x_i + \sum k_{ij}y_j \\ \omega_i &= \frac{\omega_{stance}}{e^{-by} + 1} + \frac{\omega_{swing}}{e^{by} + 1}\end{aligned}$$

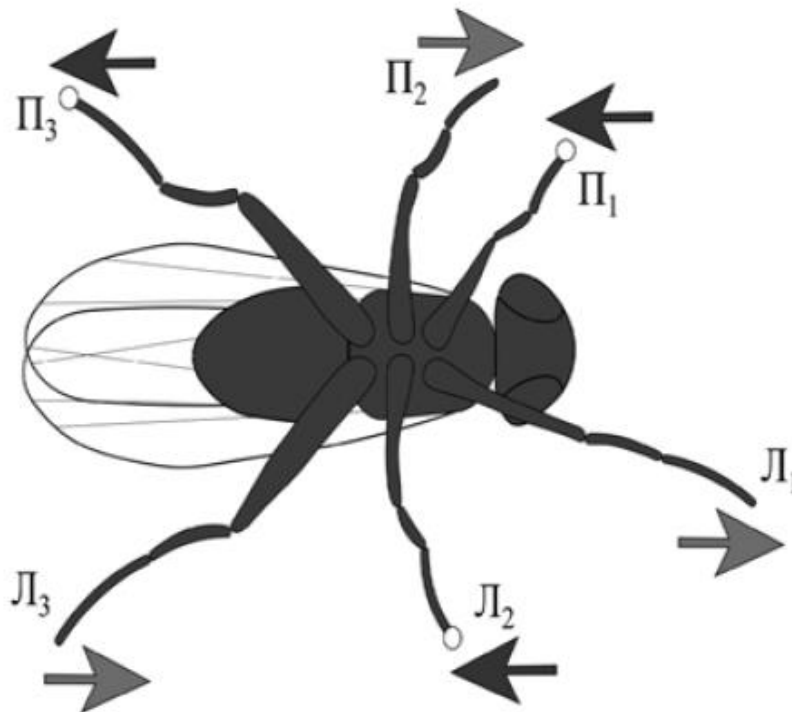


Rutishauser, S., Sprowitz, A., Righetti, L., & Ijspeert, A. J. (2008, October). Passive compliant quadruped robot using central pattern generators for locomotion control. In *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* (pp. 710-715). IEEE.

# Пример. Нейромодуляция связей

Задачи ЦГП:

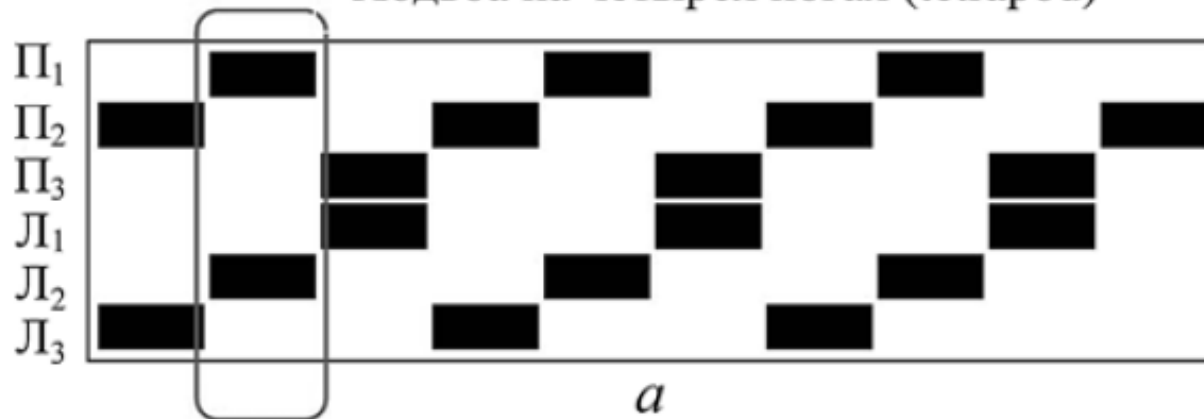
1. Генерировать правильную последовательность фаз движения
2. Переключать ритм в зависимости от команд верхнего уровня



Болдышев, Б. А., & Жиякова, Л. Ю. (2021). Нейромодуляция как инструмент управления нейронными ансамблями. *Проблемы управления*, 2(0), 76-84.

# Типы походки

Ходьба на четырех ногах (tetrapod)



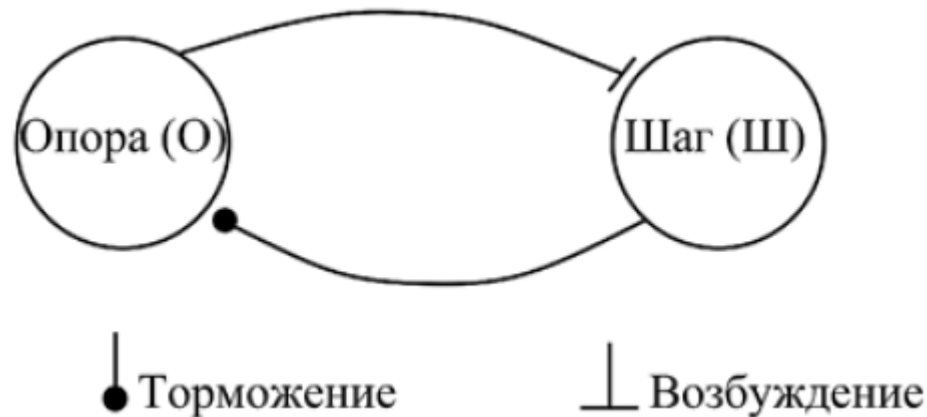
Ходьба на трех ногах (tripod)



# Антагонистические нейроны

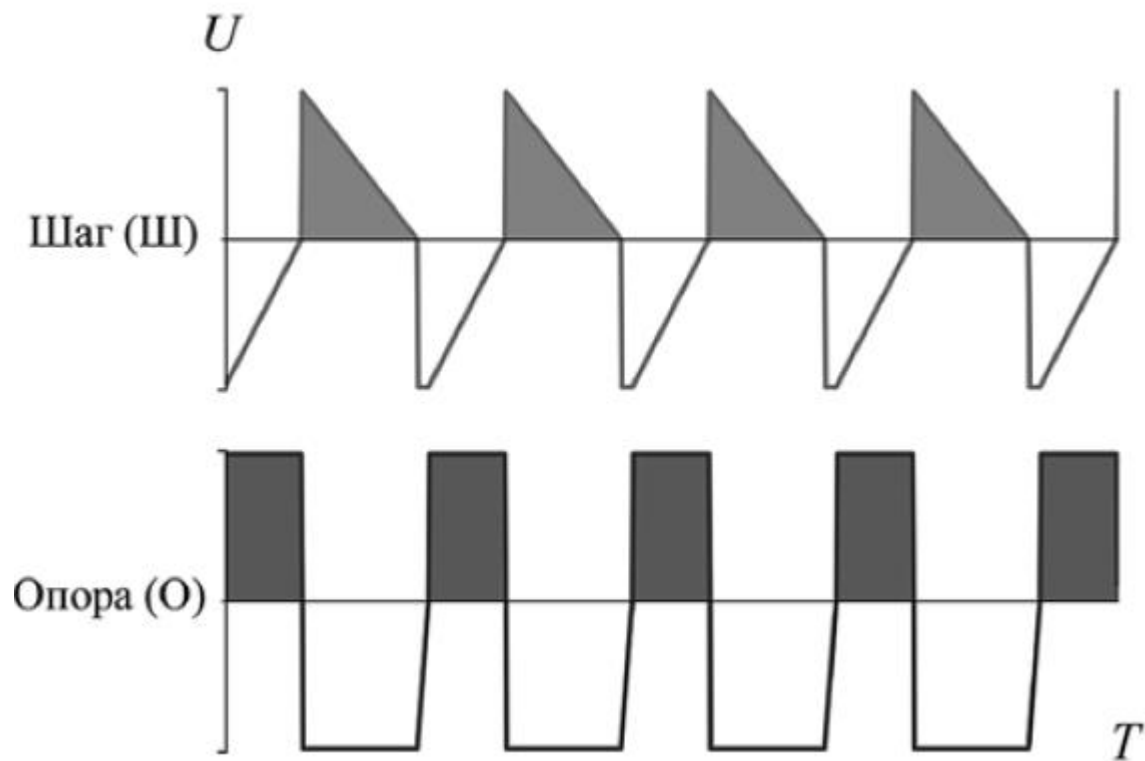
Движения одной ноги управляются парой антагонистических нейронов:

1. Нейрон опоры (О) – эндогенно активный, генерирует спайки без внешних воздействий
2. Нейрон шага (Ш) – активируется только после возбуждения от нейрона опоры





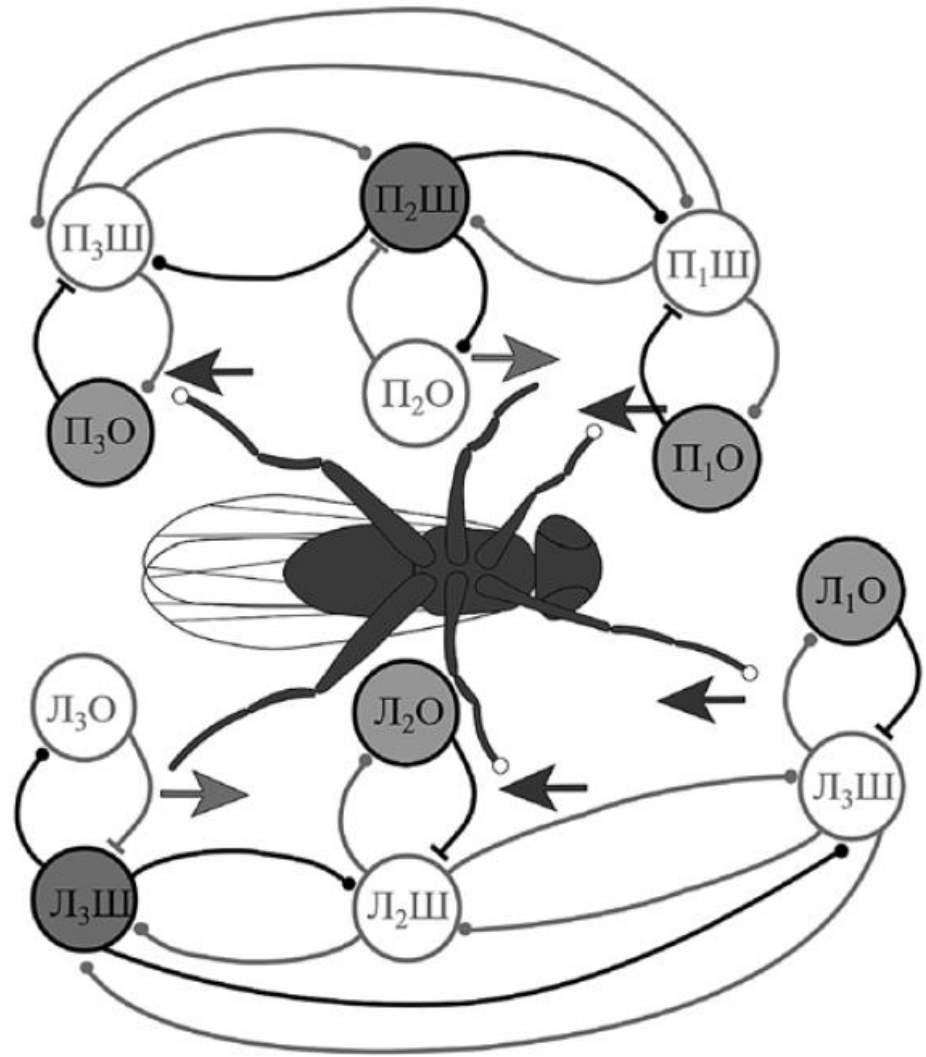
# Цикл опора-шаг



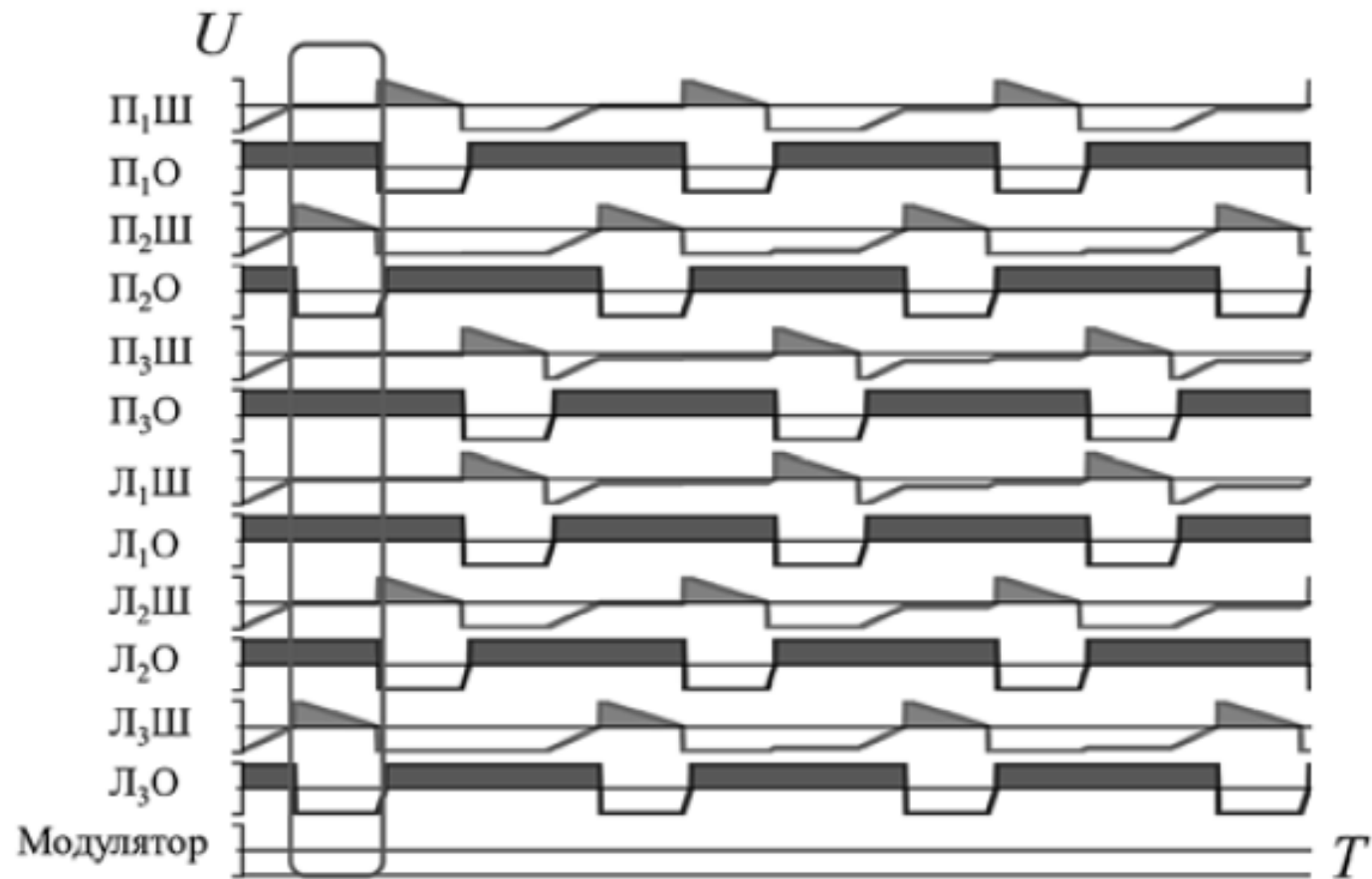
# Схема сети ЦГП

Взаимодействие нейронов при  
четырёхногий походке:  
темные нейроны активны,  
светлые – пассивны

В каждой фазе шагает одна левая  
и одна правая нога

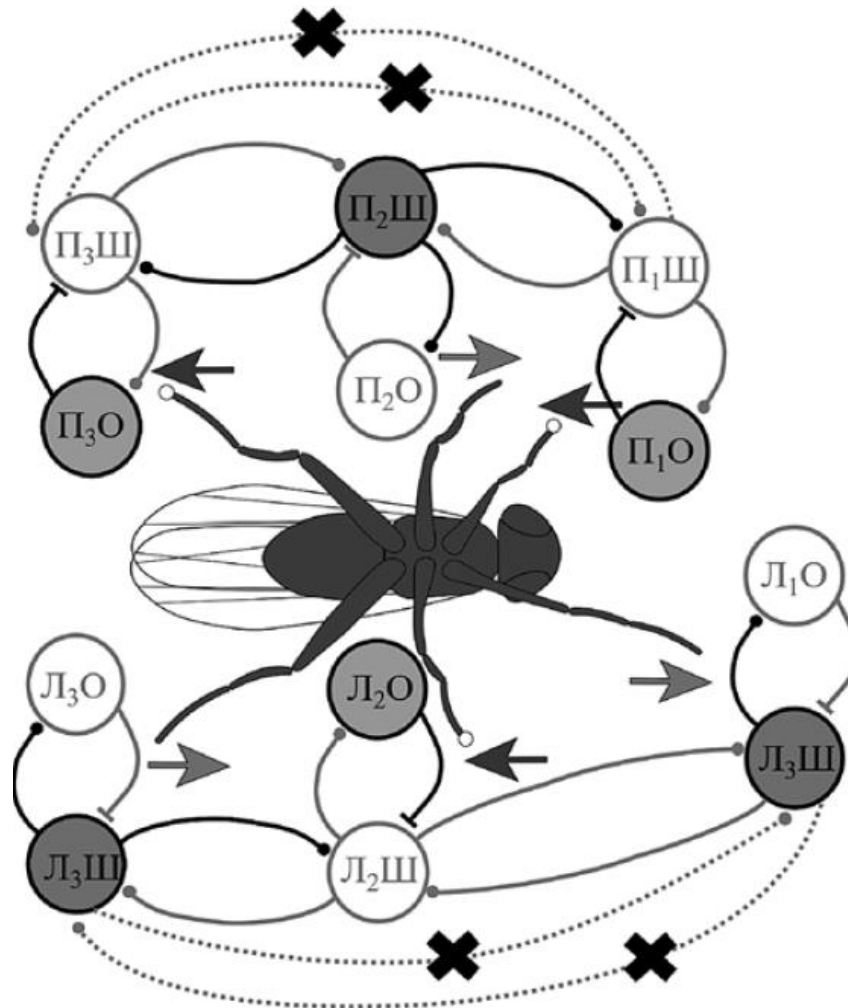


# Четырехногая походка. Активность сети

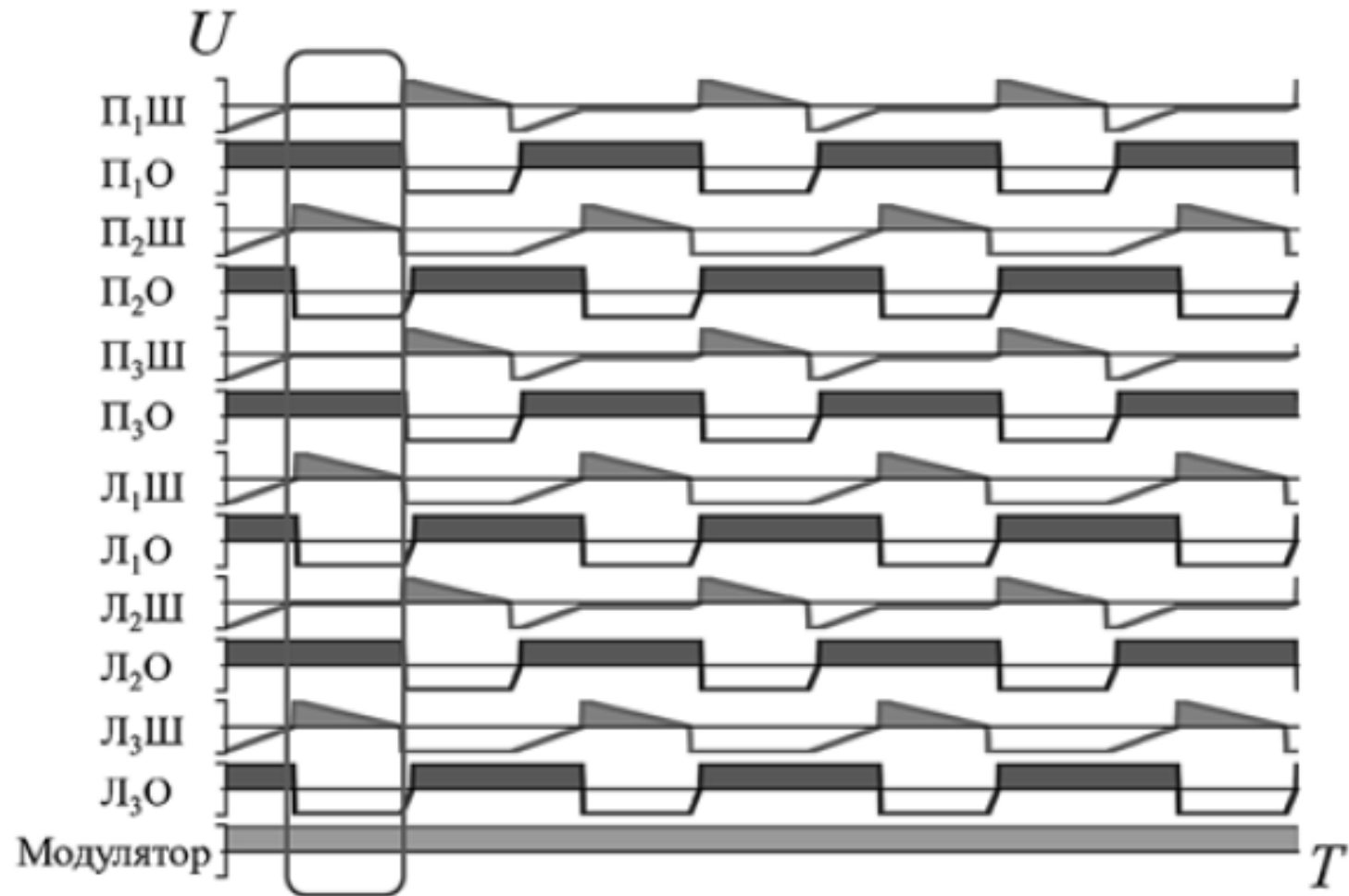


# Переключение ритма

Разные механизмы отвечают за смену ритма. Здесь реализовано изменение схемы сети за счет нейромодулирующего воздействия



# Трехногая походка. Активность сети



# Заключение

1. Моторные ритмы создаются ЦГП, которые интегрируют сигналы от мозга и моторных нейронов
2. Структура ритма определяется нейронами и связями ЦГП
3. Частота и другие параметры ритма могут меняться в широких диапазонах, сохраняя последовательность основных фаз
4. ЦГП способны переключаться между разными ритмами
5. Нейроморфное управление локомоцией успешно применяется в робототехнике