

Теория сознания и кванты информации. Версия 2/1.

Автор: Аторин Андрей, steklolampa@gmail.com

Ключевые слова: Теория сознания, синаптическая пластичность, синапсы, нейрон, механизм внимания, адаптация нейронов.

Введение.

Вторая версия теории исправила ошибки в функциях $F(t)$ и $G(t)$, тем самым завершило описание принципа работы мембранного потенциала и потенциала действия на мембране нейронов. Теория разработала математический инструмент, который описывает синаптическую пластичность, адаптацию клеток, функциональную работу внутренних систем. Теория предложила аналитическое описание механизм “внимания” и информационных параметров.

Раздел 1. Начальные условия теории.

- Теория будет обозначать все типы нейронов нервной системы, как нейроны типа N_m (тормозные нейроны), N_n (возбуждающие нейроны), N_s (рецепторные нейроны), N_d (нейроны расположенные во внутренних органах и внутренних системах организма). Нейроны N_m и N_n – это нейроны центральной нейронной сети, нейроны N_s и N_d – это нейроны периферической части нейронной сети.
- Нейроны теории имеют пространственные и временные координаты и управляются встроенными математическими функциями.
- Нейроны теории обмениваются квантами информации E . Передача квантов информации от пресинаптического к постсинаптическому нейрону – это информационный процесс. Данный информационный процесс является аналогом биологического информационного процесса, который включает следующие этапы: выделение нейромедиаторов пресинаптическим нейроном, дальнейшую их связь с рецепторами постсинаптического нейрона и запуск каскада химических реакций в постсинаптическом нейроне до момента времени, когда постсинаптический нейрон приобретет готовность к выделению нейромедиаторов (достигает порога возбуждения).
- Для оптимизации биологического разнообразия нейромедиаторов, теория разделит кванты информации на два типа: “возбуждающие”, обозначим как E_n и “тормозные”, обозначим как E_m . При этом, если численные значения возбуждающих и тормозных квантов информации равны, то $|E_n|=|E_m|$ и $E_n+E_m=0$.
- Введем в теорию пороговое значение возбуждения нейрона - $E_{пд}$, где для тормозных нейронов пороговое значение будет $E_{пд-}$, а для возбуждающих нейронов пороговое значение возбуждения будет $E_{пд+}$. Наличие порога возбуждения $E_{пд}$ в теории – это аналог значение мембранного потенциала клетки, при достижении которого, клетка испытывает возбуждение.
- Введем в теорию равновесное информационное состояние нейрона - E_n , которое будет показывать численное значение информации в нейроне, когда он находится в состоянии информационного равновесия (условного покоя).

Равновесное состояние для тормозных и возбуждающих нейронов обозначим как E_{n+} и E_{n-} .

- Введем обозначение временного интервала возбуждения для нейронов - Δt . Распишем Δt : $\Delta t = t_1 - t_0$, где t_1 – время, когда нейрон достиг или превысил значение E_{pd} ; t_0 – начальное время возбуждения нейронов квантами информации, то есть время перехода нейрона из состояния информационного равновесия, в состояние возбуждения.
- Введем временной интервал 100% рефрактерности в нейроне после достижения им порогового значения E_{pd} и обозначим его как $\Delta t'$. Распишем $\Delta t'$: $\Delta t' = t_k - t_n$, где t_n – время начала процесса передачи квантов информации пресинаптическим нейроном в постсинаптический нейрон, а t_k – время, когда завершится 100% рефрактерность в пресинаптическом нейроне. Ключевое условие 100% рефрактерности пресинаптического нейрона – это невозможность принимать кванты информации в интервале времени $\Delta t'$, а только можно испускать кванты информации в этом временном интервале.
- Введем правила в теорию. Нейроны могут быть только в одном статусе в момент времени t : если нейрон в статусе пресинаптическом, то он только испускает кванты информации и не может их принимать. И наоборот, если нейрон в статусе постсинаптическом, то он только принимает кванты информации и не может испускать их. Тормозные нейроны испускают только тормозные кванты информации E_m , а возбуждающие нейроны испускают только возбуждающие кванты информации E_p . При этом, возбуждающие и тормозные нейроны могут принимать все типы квантов информации.
- У всех нейронов есть уникальные пространственные координаты x, y, z и одна временная координата t . Так как нейроны представлены математическими функциями, то в пространстве они представлены точками – бесконечно малыми величинами.
- Нейроны в теории связаны синапсами - $j(i)$ векторами, которые соединяют нейроны в пространстве. Наличие пространственных координат у нейронов теории позволяет определить длину векторов $j(i)$ и их направление. Договоримся, что минимально расстояние внутри нейронной сети будет равно r . Длина $j(i)$ вектора будет обозначаться как $R(i)$, которая равна расстоянию между нейронами. Введем коэффициент $r(i)$, который показывает во сколько раз расстояние между данными нейронами $R(i)$, больше минимального расстояния r . Тогда $R(i) = r * r(i)$. Договоримся, что направление всех $j(i)$ векторов будет постоянным во времени, где у одного и того же нейрона могут быть разные по направлению и количеству вектора, как показано на рисунке 1. Векторное направление в синапсах обеспечивает следующие: если нейрон находится в статусе постсинаптическом, то в него поступают кванты информации только по $j(i)$ векторам, которые направлены в этот нейрон. Если нейрон находится в статусе пресинаптическом, то из него выходят кванты информации только через $j(i)$ вектора, которые направлены от нейрона. В зависимости от статуса нейрона, могут быть активны только все исходящие или все входящие вектора в нейроне. Стоит отметить, что теория не ограничивает количество разных $j(i)$

векторов, которые могут занимать одинаковое пространственное положение и направление.

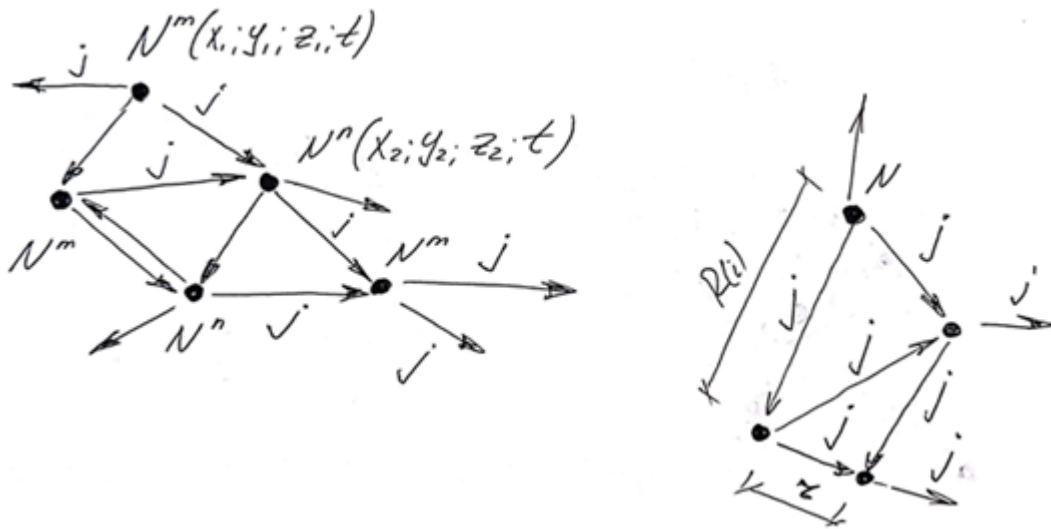


Рисунок 1. Пример геометрического представления нейронов в теории.

Раздел 2. Функции $F(t)$ и $G(t)$, которые описывают работу мембранного потенциала и порога возбуждения в клетках.

Пусть существует функция $f(t)$, которая описывает скорость поступления квантов информации по всем входящим $j(i)$ векторам в конкретный постсинаптический нейрон, независимо к какому типу он относится (возбуждающий или тормозной). Тогда за бесконечно малый интервал времени, скорость поступления квантов информации в постсинаптический нейрон можно выразить следующим уравнением:

$$f(t) = d(\sum_{i=1}^i K_i * E_{n,i}(t) + \sum_{i=1}^i K_i * E_{m,i}(t)) / dt$$

где

$E_{m,i}(t)$, $E_{n,i}(t)$ – функции, которые определяют количество квантов информации выделенных пресинаптическим нейроном в i синапс. Индекс m и n – это индексы принадлежности квантов информации к возбуждающему или тормозному типу.

i – количество входящих $j(i)$ векторов в постсинаптический нейрон.

K_i – коэффициент долей квантов информации, который зависит от длины $j(i)$ вектора, где $K_i = r(i) / R(i)$.

Умножим обе части уравнения на dt и проинтегрируем по отрезку времени Δt – временной интервал возбуждения нейронов в теории:

$$\int_{t_0}^{t_1} f(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} d\left(\sum_{i=1}^n K_i * E_{n,i}(t) + \sum_{i=1}^n K_i * E_{m,i}(t)\right)$$

Допустим, что первообразная функции $f(t)$ – это функция $F(t)$, следовательно, уравнение примет следующий вид:

$$F(t_1) - F(t_0) = \sum_{i=1}^n K_i * (E_{n,i}(t_1) - E_{n,i}(t_0)) + \sum_{i=1}^n K_i * (E_{m,i}(t_1) - E_{m,i}(t_0))$$

или

$$F(t_1) = \sum_{i=1}^n K_i * (E_{n,i}(t_1) - E_{n,i}(t_0)) + \sum_{i=1}^n K_i * (E_{m,i}(t_1) - E_{m,i}(t_0)) + F(t_0), \text{ уравнение 1}$$

Где

$F(t_1)$ – это функция, которая определяет количество квантов информации в постсинаптическом нейроне, когда он достиг или преодолел порогового значения информации Епд. Событие происходит в момент времени t_1 .

$F(t_0)$ – это функция, которая определяет количество квантов информации в нейроне в момент времени t_0 , когда постсинаптический нейрон переходит из равновесного информационного состояния в состояние возбуждения. Следовательно, $F(t_0) = E_n$, а это значит, что равновесное информационное состояние постсинаптического нейрона является переменным значением и зависит от входящей информации.

Если за интервал времени Δt , нейрон достигнет значения $F(t_1) \geq |E_{пд}|$, то он через свои исходящие $j(i)$ вектора начнет испускать кванты информации. Момент времени t_1 , является временной границей между поступлением квантов информации в нейрон и выделением квантов информации из нейрона. А значит, в момент времени t_1 , постсинаптический нейрон изменяет свой статус на пресинаптический нейрон. Это математическая оптимизация временного процесса работы натрий-калиевых насосов на мембране биологического нейрона, когда появился потенциал действия.

Введем в теорию функцию $g(t)$, которая описывает скорость выделения квантов информации из пресинаптического нейрона. В теории существует временной непрерывный интервал $\Delta t'$, который обязательно всегда наступает с момента времени t_1 . Договоримся, что функция $g(t)$ всегда будет непрерывна на временном интервале $\Delta t'$, что соответствует временной невосприимчивости клетки к возбуждению, после появления потенциала действия. Запишем уравнение скорости выделения квантов

информации из пресинаптического нейрона, которые выходят из исходящих $j(i)$ векторов:

$$g(t) = d(A * e^{-(t * n)}) / dt$$

Где

A – это значение функции $F(t_1)$ в момент времени t_1 , определяется уравнением 1.
 $A = \text{const}$ для конкретного информационного процесса в пресинаптическом нейроне.
 n – коэффициент скорости изменения функции $g(t)$, где $n = \text{tg } \lambda = A / \Delta t'$, а $\Delta t' = t_k - t_n$.

Отметим, что при переходе статуса нейрона из постсинаптического в пресинаптический, всегда будет выполняться следующие временное равенство: $t_n = t_1$.
 Таким образом, теория формирует непрерывную информационную связь между приемом и передачей квантов информации в нейронах.

Умножим обе части уравнения функции $g(t)$ на dt и проинтегрируем по отрезку времени $\Delta t' = t_k - t_n$:

$$\int_{t_n}^{t_k} g(t) dt = A * \int_{t_n}^{t_k} d e^{-(t * n)}$$

Допустим, $G(t)$ – это первообразная от функции $g(t)$, тогда интегральное выражение примет следующий вид:

$$G(t_k) - G(t_n) = -A / n * (e^{-(t_k * n)} - e^{-(t_n * n)})$$

Умножим обе части выражения на -1 . Значение функции $G(t_n) = F(t_1)$, так как время $t_n = t_1$, а значение коэффициента $A = F(t_1)$. Тогда уравнение примет следующий вид:

$$F(t_1) - G(t_k) = F(t_1) / n * (e^{-(t_k * n)} - e^{-(t_n * n)}), \text{ уравнение 2}$$

Уравнение 2 демонстрирует, сколько гарантировано квантов информации выделит пресинаптический нейрон за интервал рефракторного времени $\Delta t'$.

Свяжем между собой уравнения 1 и 2. Договоримся, что все пресинаптические нейроны выделяют равные порции квантов информации в синапсы, где реальное количество полученных квантов информации постсинаптическим нейроном, будет зависеть от уравнения 1.

Общие количество выделенных квантов информации пресинаптическим нейроном определяется выражением: $F(t_1) / n * (e^{-(t_k * n)} - e^{-(t_n * n)})$ (уравнение 2). Тогда, чтобы

определить количество квантов информации выделяемое пресинаптическим нейроном в конкретный синапс, нужно разделить общее количество квантов информации на количество синапсов. Запишем уравнение 3, которое связывает уравнения 1 и 2:

$$F(t_1) * (e^{-(t_k' + n)} - e^{-(t_n + n)}) / (n * j) = E_i(t), \text{ уравнение 3}$$

Где

j – это количество исходящих $j(i)$ векторов из пресинаптического нейрона.

$\Delta t''$ – общий непрерывный временной интервал испускания квантов информации пресинаптическим нейроном до момента времени, когда он не начнет испытывать возбуждение. Общий непрерывный интервал времени $\Delta t''$, может превышать временной интервал рефрактерности нейрона $\Delta t'$, если после окончания временного интервала $\Delta t'$, в пресинаптический нейрон не поступят кванты информации. Выразим общий временной интервал испускания квантов информации пресинаптическим нейронам $\Delta t''$, как $\Delta t'' = t_k' - t_n$, где t_k' – это время окончания выделения квантов информации из пресинаптического нейрона, если $t_k' = t_k$, то $\Delta t'' = \Delta t'$. В момент времени t_k' , нейроны переходят из статуса пресинаптического в постсинаптический. А это значит, что время $t_k' = t_0$.

Значение функции $E_i(t)$ определяет количество квантов информации, которое выделяет пресинаптический нейрон в конкретный синапс в течении времени t . Значение функции $E_i(t)$ используется в уравнении 1: $E_{i,n}(t)$ или $E_{i,m}(t)$.

Отдельно отметим, что теории пришлось ввести правило выделения пресинаптическими нейронами равных порций квантов информации в синапсы, чтобы оптимизировать уравнения. В природе пресинаптические нейроны выделяют не равное количество нейромедиаторов. При этом оптимизация теории становится справедливой за счет того, что важно не сколько выделил пресинаптический нейрон квантов информации, а сколько принял квантов информации постсинаптический нейрон.

Определим значение E_n – количество квантов информации в информационном равновесном состоянии нейрона в момент времени t_0 . Если $t_k' = t_0$, то нужно выразить из уравнения 2 значение функции $G(t_k')$, так как $G(t_k') = F(t_0)$. В постсинаптическом нейроне значение $F(t_0) = E_n$, в статус которого перейдет данный пресинаптический нейрон после завершения передачи квантов информации. Запишем уравнение определяющие E_n :

$$E_n = F(t_1) - (F(t_1) / n) * (e^{-(t_k' + n)} - e^{-(t_n + n)}), \text{ уравнение 4}$$

Выводы:

- **Функции $G(t)$ и $F(t)$ – это функции непрерывного временного цикла, которые зависят только от поступающей информации.** Это согласуется с непрерывным процессом жизнедеятельности клетки и демонстрирует, что природа и теория используют непрерывные временные интервалы для процесса обработки информации.
- Функции $G(t)$ и $F(t)$ – это непрерывные и чередующиеся друг за другом функции.
- Временное значение t_1 может наступить только в двух случаях: преодоление порога возбуждения, то есть выполнение условия $F(t_1) \geq |E_{пд}|$. Но отсутствие поступления квантов информации в постсинаптический нейрон, нарушает свойство непрерывности функции $F(t)$. Это может привести к появлению момента времени t_1 , при условии $F(t_1) < |E_{пд}|$. Данное событие наблюдается в природе: редкое, но спонтанное выделение нейромедиаторов нейронами, в которых не наблюдается потенциал действия.

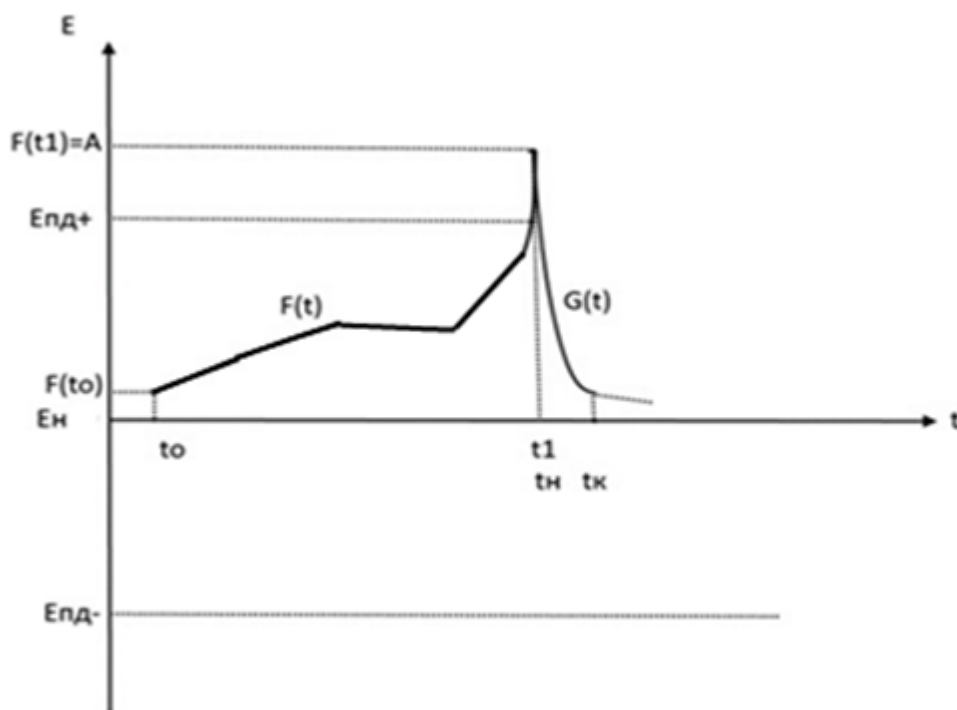


Рисунок 2. Графический пример обработки информации возбуждающим нейроном N_m .

3. Синаптическая пластичность и адаптация нейронов.

Одним из важных условий передачи информации от пресинаптического нейрона к постсинаптическому – это временная зависимость спайков пресинаптического и

постсинаптического нейрона (условие STDP). Ключевой принцип условия STDP: сначала должен появиться спайк в пресинаптическом нейроне, а потом только возможен спайк в постсинаптическом нейроне. Кроме того, синаптические связи зависят от механизмов синаптической долговременной потенциации (LTP) и механизмов синаптической долговременной депрессии (LTD), которые влияют на синаптические силы и синаптогенез - образование новых синапсов или удаление существующих.

Синаптическая сила и условие STDP.

Рассмотрим пример на рисунке 3.

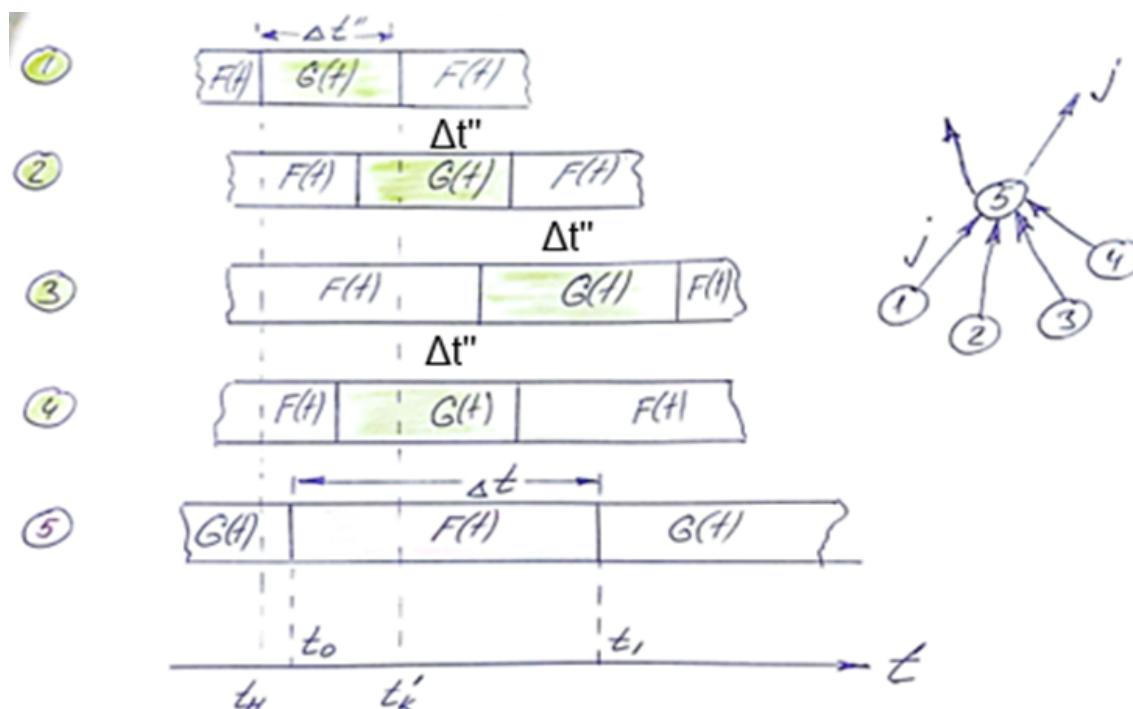


Рисунок 3. Пример диаграммы условия STDP, которая демонстрирует разные виды синхронизации в синапсах между пресинаптическими нейронами 1-4 и одним постсинаптическим нейроном 5.

На рисунке 3 представлена передача информации во времени, что демонстрирует наличие временной шкалы t внизу рисунка 3. Представлены временные полосы для каждого нейрона, которые состоят из связанных между собой прямоугольников. Каждый прямоугольник – это схематическое представление чередующихся функций $F(t)$ и $G(t)$ в нейронах 1-5. Длина каждого прямоугольника в схематической временной ленте, соответствует временному интервалу действия функции $F(t)$ или $G(t)$. Таким образом, можно наблюдать временную синхронизацию функций $G(t)$ в пресинаптических нейронах 1-4, с функцией $F(t)$ в постсинаптическом нейроне 5.

Рассмотрим временной интервал возбуждения Δt в постсинаптическом нейроне 5. В течении временного интервала $\Delta t = t_1 - t_0$, функция $F(t)$ в постсинаптическом нейроне 5

достигнет значения E_{pd} , что обеспечивает появление спайка. Пресинаптические нейроны 1-4 испускают кванты информации во временном интервале $\Delta t''$ и описываются функциями $G(t)$.

Как видно из рисунка 3, не все кванты информации пресинаптических нейронов 1-4, будут переданы постсинаптическому нейрону 5. Например, пресинаптические нейроны 2 и 4 успевают передать все свои кванты информации за интервал времени $\Delta t''$, а пресинаптические нейроны 1 и 3 передадут часть своих квантов информации. При этом, все синаптические связи отвечают условию STDP. **Важно, что условие STDP представлено теорией в оптимизированном виде, где ключевая идея – это временная синхронизация функции $G(t)$ в пресинаптическом нейроне и функции $F(t)$ в постсинаптическом нейроне, которые связаны общим синапсом.**

Во время передачи информации от пресинаптических нейронов 1-4 к постсинаптическому нейрону 5, наблюдается важная закономерность: чтобы пресинаптический нейрон передал больше информации, его временной интервал $\Delta t''$ должен быть максимально синхронизирован с временным интервалом постсинаптического нейрона Δt . То есть, интервал времени $\Delta t''$, должен стремиться оказать полностью во временном промежутке Δt .

Распишем все возможные комбинации временных синхронизаций между пресинаптическими нейронами и постсинаптическим нейроном, которые отвечают теоретическому условию STDP. Для этого введем ключевую характеристику теории – это интервал временной синхронизации T . Запишем все возможные значения T в теории:

1. $t_n = t_0$ и $t_k' = t_1$, то $T = \Delta t'' = \Delta t$, это условие соответствует полной временной синхронизации интервалов работы функции $G(t)$ в пресинаптическом нейроне и функции $F(t)$ в постсинаптическом нейроне.
2. $t_n > t_0$ и $t_k' < t_1$, то $T = \Delta t''$, где $\Delta t > \Delta t''$, что соответствует передаче информации от пресинаптических нейронов 2 и 4 в постсинаптический нейрон 5 (рисунок 3).
3. $t_n < t_0$ и $t_k' < t_1$, то $T = \Delta t'' - (t_0 - t_n)$, что соответствует передаче информации от пресинаптического нейрона 1 в постсинаптический нейрон 5 (рисунок 3).
4. $t_n > t_0$ и $t_k' > t_1$, то $T = |\Delta t'' - (t_k' - t_1)|$, что соответствует передаче информации от пресинаптического нейрона 3 в постсинаптический нейрон 5 (рисунок 3).
5. $t_n < t_0$ и $t_k' > t_1$, то $T = \Delta t$, где $\Delta t < \Delta t''$ - в данном случае наблюдается полная синхронизация, но пресинаптический нейрон не успевает передать всю порцию квантов информации постсинаптическому нейрону через общий синапс.

Количество квантов информации, которое получит постсинаптический нейрон от конкретного пресинаптического нейрона, зависит от временного интервала синхронизации T , где $T = T_1 - T_0$.

Введем в теорию коэффициент синаптической силы $C_i(t)$ для каждого синапса и запишем для него уравнение, которое будет определять синаптическую силу в конкретном $j(i)$ векторе, между пресинаптическим и постсинаптическим нейроном:

$$C_i(t) = (C_i(t-1) + (T_i(t-1) * E_i(T-1) - T_i(t-2) * E_i(T-2)) / (E_i(t-1) * \Delta t(t-1)))^2, \text{ уравнение } 5$$

Где

Индекс (t) – текущее временное событие; индекс (t-1) – временное событие, которое предшествует событию t; индекс (t-2) – временное событие, которое предшествует событию (t-1).

$C_i(t-1)$ - коэффициент синаптической силы во времени от события (t-1)

$E_i(t-1)$ – это общее количество квантов информации, которые выделяет пресинаптический нейрон в конкретный i синапс, во временном событии (t-1) и определяется уравнение 3.

$E_i(T-1)$ – это количество квантов информации, которые принял постсинаптический нейрон за временной интервал синхронизации T, через конкретный i синапс во временном событии (t-1).

$E_i(T-2)$ – это количество квантов информации, которые принял постсинаптический нейрон за временной интервал синхронизации T, через конкретный i синапс во временном событии (t-2).

$T(t-1)$ – это значения временного интервала синхронизации T между пресинаптическим и постсинаптическим нейроном в конкретном i синапсе, во временном событии (t-1).

$T(t-2)$ – это значения временного интервала синхронизации T между пресинаптическим и постсинаптическим нейроном в конкретном i синапсе, во временном событии (t-2).

$\Delta t(t-1)$ – временной интервал возбуждения постсинаптического нейрона, во временном событии (t-1).

Уравнение 5 демонстрирует, что если разница произведения временных интервалов синхронизации T и количества квантов информации, которые получит постсинаптический нейрон в разные временные события (t-1) и (t-2) будет больше 0, то есть $T_i(t-1) * E_i(T-1) - T_i(t-2) * E_i(T-2) > 0$, тогда в i синапсе будет наблюдаться механизм синаптической потенциации (LTP). И наоборот, если $T_i(t-1) * E_i(T-1) - T_i(t-2) * E_i(T-2) < 0$, то в i синапсе будет наблюдаться механизм синаптической депрессии (LTD).

Более того, выражение $(C_i(t-1) + (T_i(t-1) * E_i(T-1) - T_i(t-2) * E_i(T-2)) / (E_i(t-1) * \Delta t(t-1)))$ возводится в квадрат с целью дополнительного увеличения коэффициента синаптической силы $C_i(t)$ в синапсе, если наблюдается механизм синаптической

потенциации (LTP). И на оборот, если наблюдаться механизм синаптической депрессии (LTD), то $C_i(t)$ в синапсе дополнительно уменьшится. Таким образом, будет дополнительно контрастирование между механизмами синаптической потенциации (LTP) и синаптической депрессии (LTD).

Выражение $E_i(t-1) \cdot \Delta t(t-1)$ в уравнение 5 демонстрирует, какое максимальное количество квантов информации смог бы передать пресинаптический нейрон в постсинаптический, через конкретный i синапс, и всегда будет обеспечивать значение всей дроби $(T_i(t-1) \cdot E_i(T-1) - T_i(t-2) \cdot E_i(T-2)) / (E_i(t-1) \cdot \Delta t(t-1)) < 1$.

При определении $C_i(t)$ используются параметры временных событий $(t-1)$ и $(t-2)$, которые предшествуют текущему времени t . Причина в том, что временной интервал синхронизации T в текущем событии t , может быть определен только после завершения временного интервала возбуждения постсинаптического нейрона. Таким образом, коэффициент синаптической пластичности будет действовать с запозданием на один спайк в постсинаптическом нейроне.

Изменим основное уравнение 1 теории, добавив в него коэффициент синаптической силы, который присутствует в каждом $j(i)$ векторе, а также изменим временные интервалы функций $E_i(t)$:

$$F(t1) = \sum_{i=1}^n K_i * C_i(t) * (E_{n,i}(T1) - E_{n,i}(T0)) + \sum_{i=1}^n K_i * C_i(t) * (E_{m,i}(T1) - E_{m,i}(T0)) + F(t0), \text{ уравнение 6}$$

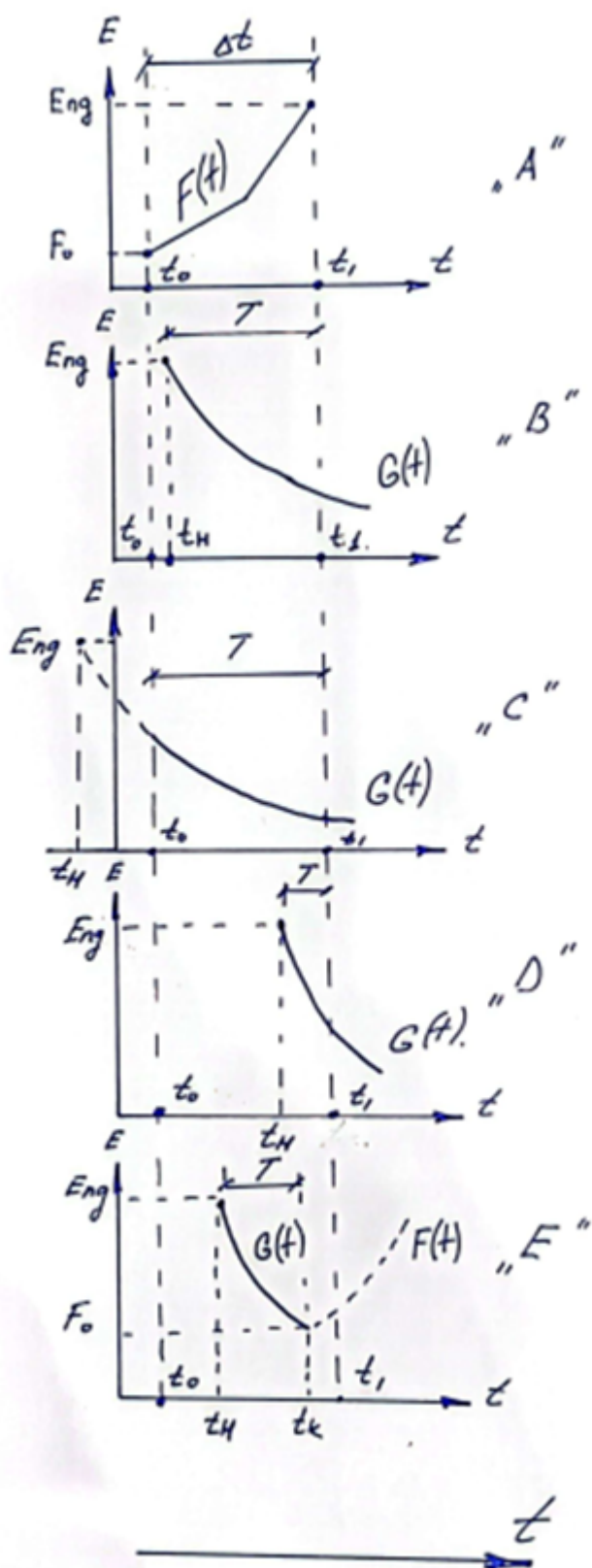


Рисунок 4. Графическое изображение разных временных интервалов синхронизации T .

На рисунке 4, представлен постсинаптический нейрон “А”, который в текущий момент времени испытывает возбуждение, что представлено действующей в нем функцией $F(t)$. Возбуждают постсинаптический нейрон “А” пресинаптические нейроны “В,С,D,E”, что демонстрирует наличие в них активных функций $G(t)$. Для всех пар пресинаптических-постсинаптических нейронов, соблюдается условие STDP, а значит $T \neq 0$.

Проанализируем изменения временных интервалов синхронизации T и как эти изменения влияют на механизмы синаптической пластичности LTP и LTD в синапсах.

Рассмотрим сначала влияние пресинаптических нейронов на механизмы синаптической пластичности. Для этого представим линейное время в синапсах в радиальном исполнении. Возьмем произвольный интервал времени, который превышает время возбуждения постсинаптического нейрона Δt и выразим его через 2π .

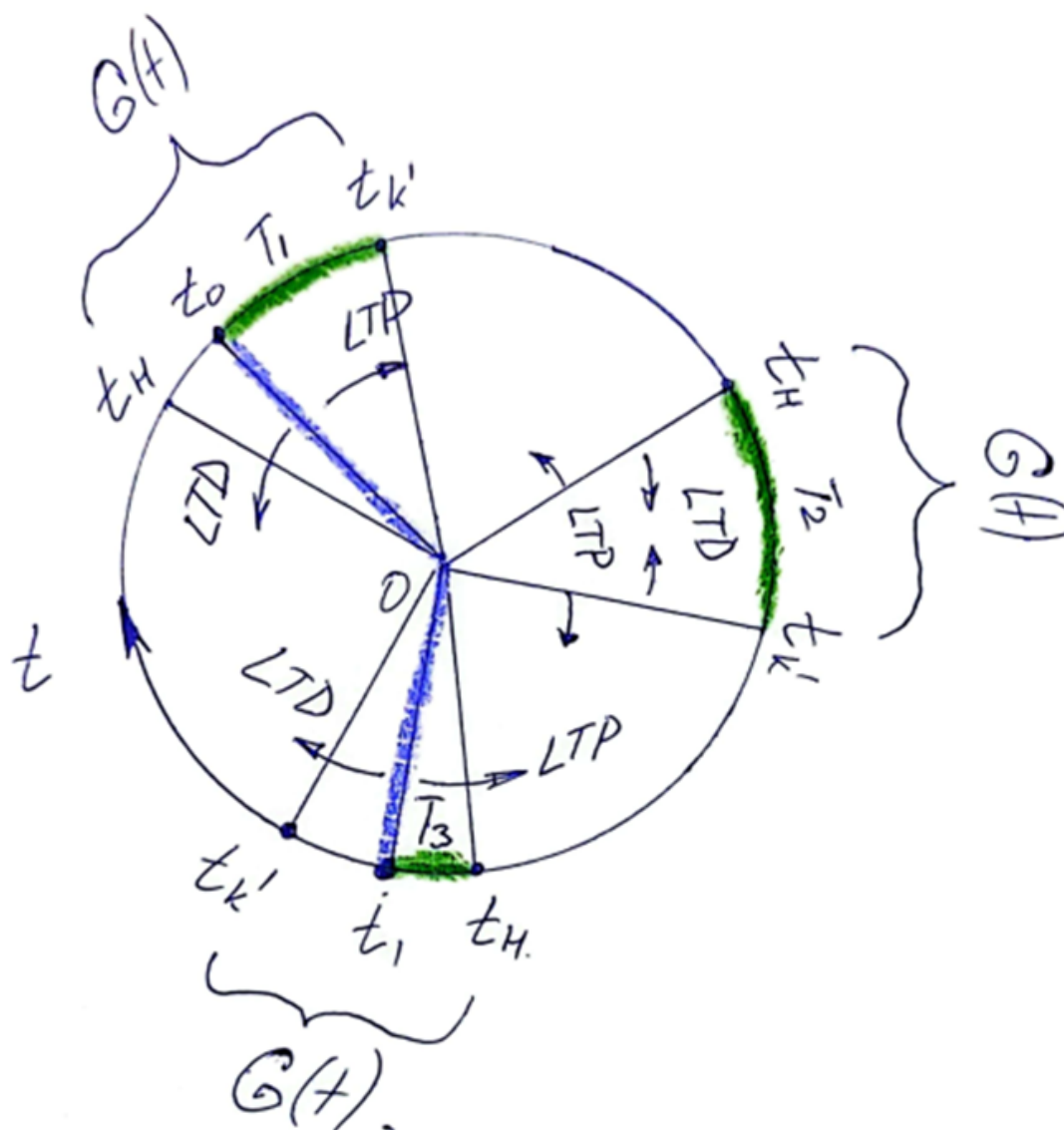


Рисунок 5. Условные 3 зоны расположения временных интервалов синхронизации T , где время представлено в радиальном исполнении.

На рисунке 5 представлен некий интервал времени 2Π , где временная стрелка t указывает направление движения времени. В данном примере есть 3 синоптические связи, которые представлены временными интервалами синхронизации T_1, T_2, T_3 . Все три временных интервала синхронизации соответствует условию STDP, следовательно, $T \neq 0$. На рисунке 5, выделены временные границы функций $G(t)$ для каждого пресинаптического нейрона, а также временные границы возбуждения постсинаптического нейрона $t_1 - t_0$. Каждая функция $G(t)$ в пресинаптическом нейроне образует свой сектор в окружности O . Сделаем мысленный эксперимент: возьмем первый сектор, который соответствует первому пресинаптическому нейрону со значением T_1 , и будем немного сдвигать относительно отрезка Ot_0 по часовой и против часовой стрелки. Если будем сдвигать сектор по часовой стрелки, то будем наблюдать усиление синаптической пластичности - проявление механизма LTP. Если будем сдвигать против часовой стрелки, то будем наблюдать ослабление синаптической пластичности – проявление механизма LTD. Договоримся, если в секторе функции $G(t)$ расположено значение времени начала возбуждения постсинаптического нейрона t_0 , то данный сектор принадлежит к условной зоне 1. Запишем для данного случая систему уравнений:

Условие для зоны 1: $\Phi_1 = t_0 - t_n$ и $\Phi_1 > 0, \Phi_1 \neq 0, T_1 \neq 0$ тогда:

если $\Phi_1(t) / \Phi_1(t-1) < 1$, наблюдается механизм LTP

если $\Phi_1(t) / \Phi_1(t-1) > 1$, наблюдается механизма LTD,

Где $(t-1)$ и t – это два последовательных временных события, где одно предшествует другому. Φ_1 – это временная характеристика зоны 1.

Система уравнений 7.1

Объяснение процессов синаптической пластичности в условной зоне 1. В интервале времени $t_0 - t_n$ расположена самая большая концентрация квантов информации, которые выделяет пресинаптический нейрон. Это вытекает из свойств функция $G(t)$, которая представлена экспоненциальной функцией с максимальным значением в момент времени $t_1 = t_n$. Свойство экспоненциальной функции $G(t)$ – это быстрое ее убывание во времени. Соответственно, если интервал времени $t_0 - t_n$ не принадлежит интервалу временной синхронизации T_1 , и будет при этом увеличиваться, то постсинаптический нейрон будет получать все меньше и меньше квантов информации, что соответствует механизму LTD. И наоборот, если интервал времени $t_0 - t_n$, который не принадлежит интервалу T_1 и при этом будет уменьшаться, то постсинаптический нейрон будет получать все больше и больше квантов информации, что соответствует механизму LTP.

Повторим эксперимент, но только для сектора пресинаптического нейрона с временным интервалом синхронизации T_3 . Если сектор сдвигать против часовой стрелки, то будем наблюдать синаптическую потенцию (LTP). Если сдвигать по часовой стрелки, то будем наблюдать синаптическую депрессию (LTD). Договоримся, если в секторе функции $G(t)$ пресинаптического нейрона находится значение времени t_1 , то данный сектор принадлежит к условной зоне 3. Запишем условие для зоны 3:

Условие для зоны 3: $\Phi_3 = t_1 - t_n$ и $\Phi_3 > 0, \Phi_3 \neq 0, T_3 \neq 0$ тогда:

если $\Phi_3(t) / \Phi_3(t-1) > 1$, проявляется динамика механизма LTP

если $\Phi_3(t) / \Phi_3(t-1) < 1$, проявляется динамика механизма LTD

Система уравнений 7.3

Объяснение работы механизмов синаптической пластичности в условной зоне 3, такая же как и для зоны 1, но анализируется другой интервал времени: $t_1 - t_n$.

Продолжим эксперимент и рассмотрим третий случай. Сектор функции $G(t)$ располагается внутри интервала времени возбуждения постсинаптического нейрона $\Delta t = t_1 - t_0$. Если сектор будет увеличиваться, то будем наблюдать усиление синаптической пластичности (LTP). Если сектор уменьшаться, то будет наблюдаться ослабление синаптической пластичности (LTD). В данном случае, такое расположение сектора функции $G(t)$, будем относить к зоне 2. Запишем условие для зоны 2:

Условие для зоны 2: $\Phi_2 = t_k' - t_n$ и $\Phi_2 > 0, t_1 - t_0 \geq t_k' - t_n, T_2 \neq 0$ тогда:

если $\Phi_2(t) / \Phi_2(t-1) > 1$, проявляется динамика механизма LTP

если $\Phi_2(t) / \Phi_2(t-1) < 1$, проявляется динамика механизма LTD

Система уравнений 7.2

Отдельно выделим случай синхронизации, когда будет выполняться условие $t_1 - t_0 < t_k' - t_n$. Для анализа важна область в районе времени t_0 , вокруг которой будет наблюдаться самая большая концентрация квантов информации, которые выделит пресинаптический нейрон. Соответственно, анализировать нужно изменение в интервале времени $t_0 - t_n$, что будет относиться к условной зоне 1.

Дополнительно, для анализа процессов в синапсах, введем в теорию долевые коэффициенты:

$$Y(i) = T_i / \Delta t, \text{ уравнения 7.4}$$

$$Y'(i) = E_i(T_i) / F(t_1), \text{ уравнение 7.5}$$

Где

$Y(i)$ –долевой временной коэффициент в i синапсе.

$Y'(i)$ –долевой информационный коэффициент в i синапсе.

$F(t_1)$ – это текущее значение функции в постсинаптическом нейроне, в момент появления спайка. Определяется уравнением 6.

$E_i(T_i)$ –это текущие количество квантов информации, которое получил постсинаптическим нейроном от пресинаптического нейрона через общий i синапс, во временном интервале синхронизации T_i , где $E_i(T_i) = E_i(T_1) - E_i(T_0)$ (уравнение 6)

Теория рассмотрела динамическое изменение функций $G(t)$ в пресинаптических нейронах, но временное положение функции $F(t)$ в постсинаптическом нейроне, также динамическое и влияет на синаптическую пластичность синапсов.

Чтобы понять общую динамику временных изменений функций $G(t)$ и $F(t)$, нужно проанализировать динамику изменений коэффициентов синаптических сил.

Рассмотрим на гипотетическом примере динамику изменения коэффициентов синаптических сил, при действии механизмов синаптической пластичности LTP и LTD. Допустим, в большинстве синапсах, которые соединяют пресинаптические нейроны с одним постсинаптическим нейроном, будет наблюдаться механизм LTP. Тогда коэффициенты синаптической силы в этих синапсах будут возрастать, что согласуется с уравнением 5. Рост коэффициентов синаптических сил, повлияет на уменьшение временного интервала возбуждения постсинаптического нейрона Δt . Причина уменьшения времени возбуждения постсинаптического нейрона, скрывается в незначительном изменении порога возбуждения E_{pd} в постсинаптическом нейроне. В разделе адаптация нейронов будет продемонстрировано, что порог возбуждения E_{pd} – это переменная величина, которая изменяется незначительно в нормальных информационных условиях. Соответственно, если пороговое значение E_{pd} незначительно изменяется, то увеличение коэффициентов синаптических сил в уравнении 6, будет уменьшать временной интервал возбуждения постсинаптического нейрона.

Как долго увеличение коэффициентов синаптических сил будут уменьшать временной интервал возбуждения постсинаптического нейрона? Уменьшение времени возбуждения постсинаптического нейрона может привести к условию, когда в синапсах будет наблюдаться недостаточное количество квантов информации, чтобы сформировать спайк в постсинаптическом нейроне. Тогда в синапсах, где наблюдался ранее механизм синаптической потенциации LTP, произойдет изменение механизма LTP на механизм синаптической депрессии LTD. Только в таком случае можно увеличить количество поступления квантов информации в постсинаптический нейрон, так как механизм синаптической депрессии LTD обеспечит увеличение интервала времени возбуждения постсинаптического нейрона. Это вытекает из анализа уравнений 5 и 6. Но действие механизма синаптической депрессии LTD в этих синапсах будет не продолжительным. Так как увеличение временного интервала возбуждения

постсинаптического нейрона приведет к смене механизма LTD, на механизм LTP, который обратно со временем столкнется с проблемой нехватки квантов информации для возникновения спайка в постсинаптическом нейроне.

В итоге вначале доминируют определенные механизмы синаптической пластичности LTP или LTD, которые резко изменяют свои значения, так как ощущают действие нового стимула. Но в течении непродолжительного времени действия стимула, значения коэффициентов синаптических сил в синапсах будут изменяться все меньше и меньше. В конечном итоге произойдет адаптация синаптических связей к стимулу – сформируется равновесное состояние между LTP и LTD в каждом синапсе.

Ближайшее по времени равновесное состояние между LTP и LTD в синапсах, которое вызвано стимулом, будем далее называть относительным равновесным состоянием в синапсах.

Коэффициенты синаптических сил – это динамические величины, которые постоянно изменяются под воздействием стимулов. Относительное равновесное состояние в синапсе – это ближайшее по времени состояние равновесия механизмов LTP и LTD в конкретном синапсе, которое получено под воздействием стимула. То есть изменение коэффициента синаптической силы становится незначительным, где ключевым условием является $\Delta C(i) \rightarrow 0$:

$$C_i(t) = C_i(t-1) \pm \Delta C(i), \text{ уравнение 7.6}$$

где $\Delta C(i)$ - амплитуда изменений коэффициента синаптических сил в конкретном синапсе при достижении относительного равновесного состояния.

Незначительное изменения коэффициентов синаптических сил приводит к временной стабильности информационного процесса. А это в свою очередь, является способом распознавания стимула постсинаптическим нейроном. Таким образом, чем быстрее в синапсах формируются относительные равновесные состояния, тем быстрее появится 100% селективность на стимул у постсинаптического нейрона. Чтобы выйти из относительного равновесного состояния, нужно просто сменить стимул 1 на стимул 2. Теория утверждает, что кодирование информации происходит в синапсах и выражено коэффициентами синаптических сил, которые соответствуют относительному равновесному состоянию для конкретного стимула. Ключевая проблема появления относительного равновесного состояния в конкретном синапсе – это время его формирования.

Утверждение теории согласуется с рядом исследований и теорий. Например, гомеостатическая пластичность, которая обеспечивает стабильность нейронных сетей, регулируя уровни возбуждения и торможения, чтобы предотвратить их чрезмерную

активность или подавление. Ключевая идея: когда LTP и LTD находятся в равновесии, гомеостатические механизмы стабилизируют активность сети, а скорость изменений пластичности снижается. Подтверждение теории статья "Homeostatic Synaptic Plasticity: Local and Global Mechanisms for Stabilizing Neuronal Function", автор Gina G. Turrigiano

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3249629/>. Гомеостатическая синаптическая пластичность (HSP) обеспечивает стабильность активности нейронных сетей, предотвращая их перенасыщение или чрезмерное подавление активности. HSP позволяет нейронным сетям поддерживать баланс между возбуждающими и тормозящими сигналами, несмотря на изменения внешней среды и внутренней активности.

Другой пример - метапластичность. Метапластичность (meta-plasticity) описывает адаптацию механизмов пластичности, таких как LTP и LTD, в зависимости от предшествующего опыта. Ключевая идея: равновесие между LTP и LTD приводит к снижению скорости изменений пластичности (например, через модификацию порогов индукции LTP/LTD). Подтверждение теории: в исследовании "Metaplasticity: a new vista across the field of synaptic plasticity" (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9247968/>), авторы Huang и другие обсуждают роль метапластичности в поддержании нейронных сетей на энергетически оптимальном уровне. Они рассматривают, как метапластичность позволяет нейронам адаптироваться к изменениям в окружающей среде, обеспечивая баланс между пластичностью и стабильностью.

Другие теории. Например, Теория критического состояния. Эта теория предполагает, что нейронные сети находятся в состоянии, близком к критической точке, где равновесие между LTP и LTD позволяет достичь максимальной адаптивности при минимальных изменениях. Ключевая идея: при достижении равновесия между LTP и LTD скорость пластических изменений снижается, чтобы поддерживать сеть в состоянии высокой чувствительности к внешним стимулам.

Еще пример - энергетическая оптимизация. Эта теория предполагает, что равновесие между LTP и LTD минимизирует энергозатраты мозга. Скорость синаптической пластичности снижается, чтобы избежать избыточного потребления энергии.

Определим частоту спайка в нейроне:

$$f' = N / \sum_1^N t_1, \text{ уравнение 8.1}$$

$$f' = N / \sum_1^N t_n, \text{ уравнение 8.2}$$

Где

t_1 – время появления спайка в постсинаптическом нейроне.

t_n – время появления спайка в пресинаптическом нейроне.

N- количество спайков в единицу времени.

По условию теории $t_1 = t_n$, следовательно, уравнение 8.1 и 8.2 описывают один и тот же нейрон, но в разных статусах: постсинаптическом и пресинаптическом статусе.

Из уравнений теории следует, что частота постсинаптического нейрона, обратно пропорциональна интервалу времени возбуждения Δt этого постсинаптического нейрона: если растет частота, то уменьшается интервал времени возбуждения нейрона. И наоборот, если уменьшается частота, то увеличивается интервал возбуждения нейрона.

Следовательно, действие механизма синаптической потенциации (LTP) приводит к увеличению частоты спайка в постсинаптическом нейроне. И наоборот, действие механизма синаптической депрессии (LTD), приводит уменьшению частоты спайка в постсинаптическом нейроне. При наступлении относительного равновесного состояние в синапсах, частота спайка нейрона должна стабилизироваться.

Например, исследование "Inferring learning rules from distributions of firing rates in cortical neurons" Sukbin Lim, Jillian L McKee и другие (https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4666720/?utm_source=chatgpt.com) В исследовании рассматривается методика вывода правил обучения из распределений частот спайков в корковых нейронах. Авторы отмечают, что в процессе обучения наблюдается увеличение частоты спайков, что способствует укреплению синаптических связей. После завершения обучения активность нейронов стабилизируется, отражая закрепление новых навыков и знаний.

Исследование "A model of hippocampal spiking responses to items during learning of a context-dependent task ", Florian Raudies, Michael E. Hasselmo (<https://www.frontiersin.org/journals/systems-neuroscience/articles/10.3389/fnsys.2014.00178/full>). В исследовании наблюдался рост селективности определенных клеток гиппокампа животного, на определенные стимулы во время обучения. После определенного количества попыток возбуждения нейронов, наблюдалось устойчивое значение селективности на уровне 100%.

Статья 'Learning to represent signals spike by spike' Wieland Brendel и другие. (<https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1007692>). В статье описано, что частота спайков нейрона изменяется в процессе обучения до момента, когда достигается оптимальное кодирование. Этот процесс включает балансировку возбуждающих и тормозящих входов, чтобы минимизировать ошибки и максимально эффективно передавать сигнал.

Другие выводы теории:

- Математически оформлено условие STDP, при наличии которого, временной интервал синхронизации должен быть всегда $T \neq 0$.
- Механизм синаптической потенциации (LTP) описывается значениями коэффициентов синаптических сил в интервале $(1; C_i(t)_{\max}]$, где $C_i(t)_{\max}$ задается начальными условиями теории. Механизм синаптической депрессии (LTD) описывается значениями коэффициентов синаптических сил в интервале $[C_i(t)_{\min}; 1)$, где $C_i(t)_{\min}$ задается начальными условиями теории. Интервал значений механизмов LTP и LTD важен, так как он позволяет теории сформировать границу между действием синаптических сил и появлением функциональных изменений в синапсах – запуск синаптогенеза.
- Если коэффициент синаптической силы $C_i(t)=1$, то наблюдается “идеальное” равновесие коэффициентов синаптических сил. Следовательно, относительное равновесное состояние становится не относительным, а идеальным равновесным состоянием. Но в динамической системе, где постоянно изменяются множество стимулов, это маловероятное событие в синапсах, когда $T_i(t-1) \cdot E_i(T-1) - T_i(t-2) \cdot E_i(T-2) = 0$ (уравнение 5).

Синаптогенез.

Выход за рамки интервалов коэффициентов синаптических сил или постоянная во времени динамика действия механизма LTP или LTD в синапсе, должна приводить к функциональным изменениям синаптических связей, а именно синаптогенезу.

В биологической системе механизм синаптической пластичности LTP и LTD имеет две разновидности:

- E-LTP и E-LTD – это механизмы кратковременной синаптической пластичности, связанные с временным изменением синаптической пластичности в интервале времени от секунд до пару часов, который не приводит к структурным изменениям в клетке и его синаптических связей.
- L-LTP и L-LTD – это механизмы долгосрочной синаптической пластичности. Данный процесс связан с изменениями на уровне структуры нейронов и его связей, который может сохранять синаптическую пластичность в интервале времени от многих часов и даже дней.

Коэффициент синаптической силы $C_i(t)$ описывает синаптические силы, что больше согласуется с механизмами E-LTP и E-LTD. Тогда, чтобы реализовать механизмы L-LTP и L-LTD, нужно внедрить другой параметр, который тесно связан с коэффициентом синаптической силы $C_i(t)$, но при этом вносит функциональные изменения в нейронные связи. Введем в теорию коэффициент синаптогенеза $C'_i(t)$ для каждого синапса, который будет отвечать за структурные изменения в нейроне - аналог механизмов L-LTP и L-LTD. Задача коэффициента синаптогенеза - удалять или

добавлять синапсы. Свяжем коэффициент синаптогенеза с коэффициентом синаптической силы для каждого входящего $j(i)$ вектора в постсинаптический нейрон:

$$C'i(t) = C'i(t-1) + Ci(t), \text{ если } Ci(t) > Ci(t-1) \text{ уравнение 9.1}$$

$$C'i(t) = C'i(t-1) - Ci(t), \text{ если } Ci(t) < Ci(t-1) \text{ уравнение 9.2}$$

Где

$C'i(t)$ – это текущие значение коэффициента синаптогенеза, которое определяется в момент времени $t1$.

$C'i(t-1)$ - это предыдущие значение коэффициента синаптогенеза.

$Ci(t)$ – это текущие значение коэффициента синаптической силы, которое определяется в момент времени $t0$.

$Ci(t-1)$ – это предыдущие значение коэффициента синаптической силы.

Запишем математические условия образования и удаления синапсов:

- **Формирование нового синапса $C'i(t) \geq C'i(t)_{\max}$, неравенство 9.3**
- **Удаление существующего синапса $C'i(t) \leq C'i(t)_{\min}$, неравенство 9.4**

Где

$C'i(t)_{\max}$ и $C'i(t)_{\min}$ – критические значения коэффициентов синаптогенеза, которые задаются начальными условиями теории.

В качестве примера, теория предлагает рассмотреть один из алгоритмов появления нового синапса:

Если $C'i(t) \geq C'i(t)_{\max}$, то формируется новый входящий синапс у постсинаптического нейрона. Например, сформированный новый синапс - $j(i)$ вектор, который будет занимать то же самое пространственное положение и направление, что занимает синапс, обеспечивший условие синаптогенеза. Таким образом, информационный канал от пресинаптического нейрона к постсинаптическому нейрону, будет расширен при помощи второго синапса и уменьшит показатели коэффициентов синаптических сил, что стабилизирует информационную передачу.

Или можно сформировать новый синапс выходящий из пресинаптического нейрона и связывается с новыми нейронам, с которым ранее не было синаптической связи. Таким образом, можно масштабировать информационный поток в новом направлении.

Определение длины синапса можно реализовать через координаты: длина синапса $R(i)$ определяется следующим образом: $R(i) = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}$, где x_1, y_1, z_1 - координаты нового нейрона, в который входит $j(i)$ вектор; x_0, y_0, z_0 - координаты

пресинаптического нейрона, из которого выходит $j(i)$ вектор. Определение положения в пространстве нового нейрона определяется условием: $R(i) \rightarrow r$ и $\cos(a) \rightarrow 1$, где угол "a" образует $j(i)$ вектор, в котором выполнено условие $C'i(t) \geq C'i(t)_{\max}$ и другой $j(i)$ вектор, который соединяет пресинаптический нейрон с новым нейроном.

Адаптация нейронов.

Одно из важных свойств всех клеток, включая биологические нейроны – это их адаптивные свойства. Адаптация влияет на информационные процессы. Например, при интенсивных и постоянных повторений возбуждений биологических нейронов, они могут демонстрировать резистентность к этим возбуждениям.

В уравнение 6 есть значение функции $F(t_0)$, которое определяет количественный показатель информации в нейроне на момент времени t_0 . Теория предполагает, что наблюдая за изменениями внутреннего информационного состояния нейрона во времени, можно построить математическую модель его адаптации к стимулам.

Введем в теорию коэффициент адаптации A' для нейронов и запишем его в следующем виде:

$$A' = F(t_0) / F(t_0 - 1), \text{ уравнение 10}$$

где

$F(t_0)$ – это значение функции $F(t_0)$ в нейроне в момент времени t_0 , когда он начинает испытывать возбуждение. Данный момент времени – это настоящее временное событие t , определяется уравнением 4;

$F(t_0 - 1)$ – это значение функции $F(t_0)$ в нейроне, во временном событии $t - 1$, которое предшествует текущему событию возбуждения постсинаптического нейрона.

Свяжем между собой коэффициент адаптации A' и текущий порог возбуждения постсинаптического нейрона $E_{\text{пд}}$. Таким образом, $E_{\text{пд}}$ будет зависеть от изменения коэффициента адаптации A' , а значит $E_{\text{пд}} \neq \text{const}$, что согласуется с изменяющимся пороговым значением возбуждения в живых клетках.

Идея в том, чтобы реализовать следующую логику: если коэффициент адаптации высокий, то нужно сделать выше порог возбуждения, что усложнит последующие появление спайка в постсинаптическом нейроне. Это будет способствовать появлению резистентности к стимулу. И наоборот, если нет возбуждений, тогда коэффициент адаптации стремится к 0 (вытекает из свойства экспоненциальной функции $G(t)$), а значит, порог активации должен быть понижен, что упростит последующие появление спайка в постсинаптическом нейроне. Это будет согласовываться с таким явлением как гиперчувствительность или гомеостатическая пластичность в биологических нейронах. Если же коэффициент адаптации константа или незначительно изменяется, то наблюдается стабильная передача информации, что соответствует сформированному

или приближенному к относительному равновесному состоянию в синапсах, а это значит, что постсинаптический нейрон адаптировался к стимулу.

Договоримся, что текущие значение коэффициента адаптации A' , будет всегда определять текущие значение порога возбуждения Епд в постсинаптическом нейроне.

В начальных параметрах теории будет определено номинальное значение порога возбуждения нейронов $Епд(n)=const$ и минимальное информационное состояние нейронов $Ен(m)=const$. Запишем уравнения, которые связывают коэффициент адаптации A' с текущим пороговым значением возбуждения Епд:

$$A' = F(t_0) / F(t_0-1)$$

$$a = \ln(A'), a \in [a_1; a_2]$$

(a_1 и a_2 задаются в начальных условиях теории и являются константами)

$$Епд(t_1) = Епд(n) * a$$

$$Епд(n_{max}) = k_1 * Епд(n)$$

$$Епд(n_{min}) = k_2 * Ен(m)$$

система уравнений 11

Где

$\ln$ – натуральный логарифм.

$Епд(t_1)$ – определяемое значение порога возбуждения в постсинаптическом нейроне.

$Епд(n)$ – номинальное пороговое значение, где $Епд(n)=const$.

$Ен(m)$ – минимальное информационное состояние нейрона, где $Ен(m)=const$.

k_1, k_2 – константы, которые определяются в начальных условиях теории.

Проанализируем уравнения 10 и 11:

1. Резистентность нейронов – способность нейронов адаптироваться к постоянным, повторяющимся или монотонным стимулам, снижая свою реакцию на них. Уменьшение интервала времени возбуждения Δt в постсинаптическом нейроне (или увеличение частоты возбуждения, из-за постоянных или монотонных возбуждений), вынуждает постсинаптический нейрон быстро переходить от функции $G(t)$ к функции $F(t)$. Быстрый переход от функции $G(t)$ к функции $F(t)$ не обеспечивает снижение значения функции $F(t_0)$ во времени, а наоборот способствует его росту или высокому значению, уравнение 4. Увеличение текущего значения $F(t_0)$ приведет

к увеличению значения A' , уравнение 10. Увеличение значения A' приводит к увеличению значения $E_{pd}(t_1)$, уравнение 11. Увеличенное пороговое значения возбуждения нейрона $E_{pd}(t_1)$ – это проявление резистентности, то есть, постсинаптическому нейрону становится сложнее достичь более высоких порогов возбуждения.

2. Гомеостатическая пластичность в нейронах – это механизм, который обеспечивает постоянный уровень активности нейрона, когда нейронная активность падает. Если увеличивается интервал времени возбуждения Δt в постсинаптическом нейроне (снижается частота возбуждений), то функция $G(t)$ долгое время не изменяется на функцию $F(t)$. А это значит, что уменьшается значение $F(t_0)$ во времени. Понижение значения $F(t_0)$, снизит текущее значение A' , уравнение 10. Понижение значения A' , приводит к снижению значения $E_{pd}(t_1)$, уравнение 11. Пониженное пороговое значения возбуждения нейрона $E_{pd}(t_1)$ – это проявление гомеостатической пластичности, а это значит, что после продолжительного времени отсутствия возбуждения, нейрону будет проще достичь низкий порог активации в текущем временном интервале возбуждения.

4. Семейство функций $N_i(t)$ в рецепторных нейронах N_c и математическая связь квантов информации с энергией окружающей среды.

Теория сознания и кванты информации утверждает, что кванты информации, которыми непосредственно обмениваются нейроны в теории связаны с энергией переносчиков внешней среды. Природа сформировала рецепторы, которые специализируются на конкретный тип переносчиков энергии окружающей среды. Соответственно, в теории будет целое семейство функций $N_i(t)$.

Рассмотрим один пример, который демонстрирует формирование одной из множества функций $N_i(t)$. Для примера возьмем зрительную системы, а именно фоторецепторы L-колбочки. Данные фоторецепторы принадлежат к группе нейронов типа N_c . В нейронах N_c нет функции $F(t)$, вместо нее функция $N_i(t)$.

Известно, что L-колбочки взаимодействуют с фотонами, у которых длина волн находится в диапазоне 560-580 нм.

Запишем уравнение, которое определяет энергию одного фотона.

$$E = h \cdot c / \lambda, \text{ уравнение 12}$$

где

λ – длина волны света; c – скорость света; h – постоянная Планка.

Если c и h – это константы, тогда энергия фотона зависит от длины волны электромагнитного излучения.

В реальных условиях свет не монохроматический, а состоит из фотонов с разными длинами волн.

Воспользуемся функцией плотности распределения фотонов $p(\lambda, t)$ по длинам волн $\Delta\lambda \in [560; 580]$ в момент времени t . Чтобы определить общее количество фотонов в непрерывном интервале длин волн $\Delta\lambda$ в любой момент времени, нужно проинтегрировать функцию плотности распределения фотонов $p(\lambda, t)$ по интервалу $\Delta\lambda$. Запишем уравнение, которое определяет количество фотонов в интервале длин волн $\Delta\lambda$:

$$\Phi(t) = \int_{560}^{580} p(\lambda, t) * d\lambda, \text{ уравнение 13}$$

Теперь можно определить энергию всех фотонов в момент времени t , подставив значения уравнения 13 в уравнение 12:

$$E'i = \int_{560}^{580} h * \frac{c}{\lambda} * p(\lambda, t) * d\lambda, \text{ уравнение 14}$$

Допустим, функции $h_i(t)$ определяет скорость изменения энергии всех фотонов, в кванты информации в любой момент времени t , на непрерывном временном интервале возбуждения рецептора Δt . Запишем уравнение функции $h_i(t)$:

$$h_i(t) = X_i * dE'i(t) / dt, \text{ уравнение 15}$$

Где

$E'i(t)$ – это количество энергии всех фотонов в конкретный момент времени t , определяется уравнением 14.

X_i – это коэффициент пропорциональной зависимости энергии конкретного типа переносчика внешней среды и кванта информации. Индекс i определяет принадлежность к природе переносчиков (электромагнитные волны, звуковые волны и так далее). X_i определяется в начальных условиях теории.

Первообразная функции $h_i(t)$ – это функция $H_i(t)$. Тогда нужно проинтегрировать уравнение 15 в интервале непрерывного временного возбуждения рецептора $\Delta t = t_1 - t_0$:

$$\int_{t_0}^{t_1} h_i(t) dt = X_i * \int_{t_0}^{t_1} dE'i(t)$$

Решим интегральное уравнение:

$$H_i(t_1) - H_i(t_0) = X_i * (E'_i(t_1) - E'_i(t_0)), \text{ уравнение 16}$$

Выделим значение функции $H_i(t)$ в момент времени t_1 , когда рецептор достигнет порогового значения возбуждения:

$$H_i(t_1) = X_i * (E'_i(t_1) - E'_i(t_0)) + H_i(t_0), \text{ уравнение 17}$$

Из уравнения 17 следует, что количество сформированных квантов информации рецепторами зависит от изменения энергетического состояния окружающей среды и от внутреннего информационного состояния самого рецептора $H_i(t_0)$.

После того как функция $H_i(t_1)$ достигнет порогового значения возбуждения, в нейроне N_c запустится функция $G(t)$. В нейронах N_c функция $G(t)$ непрерывна на интервале времени $\Delta t'$.

Пороговое значение возбуждения рецептора, также зависит от коэффициента адаптации:

$$A' = H_i(t_0) / H_i(t_0 - 1), \text{ уравнение 18}$$

где $H_i(t_0)$ - это текущее информационное состояние рецептора, на момент времени начала возбуждения рецептора t_0 ;

$H_i(t_0 - 1)$ - это предыдущее информационное состояние в нейроне N_c , которое предшествует событию t .

Алгоритм определения порога возбуждения нейрона N_c идентичный как и у других нейронов и описывается уравнениями 10 и 11.

5. Внутренние функциональные системы и внутренние органы нервной системы.

Все внутренние системы имеют выраженную периодичность работы, например, сердечные ритмы, дыхательная система и другие. Или относительную периодичность, например, пищеварительная система, работа желез и другое. В основе работы внутренних систем лежит их синхронизированная периодичность в нормальном состоянии. Изменение в синхронизации и периодичности работы внутренних органов (систем), которое вызвано импульсами поступающими с центральной нейронной сети, может являться маркером информационных процессов протекающих внутри центральной нейронной сети.

Теория представит время в двух математических формах: линейное представление времени - это абсолютная форма времени в теории, которое непосредственно определяет работу функций в нейронах типа N_c , N_m , N_n . И представим время в виде постоянно меняющихся периодов - это относительное представление течения времени,

которое будет определять работу функций в нейронах типа Nd. Нейроны типа Nd – это нейроны теории, которые управляют процессами во внутренних органах и внутренних системах. Относительная форма времени постоянно связана с абсолютной формой времени.

Представим относительную форму времени через одну из периодических функций - $\sin(A't)$, где A' – это коэффициент адаптации теории. Нейроны типа Nd, так же управляются функциям $F(t)$ и $G(t)$, но в отличие от других нейронов теории, у нейронов Nd не будет порога активации. Вместо порогового значения активации, функции $F(t)$ и $G(t)$ будут зависеть от периода функции $\sin(A't)$. У функции $\sin(A't)$ есть период $T'=2\pi/A'$. Договоримся, что в положительных полупериодах функции $\sin(A't)$, которые находятся в интервалах $[2n\pi; (2n+1)\pi], n \in \mathbb{Z}$, будет всегда активирована функция $F(t)$. А в отрицательных полупериодах, которые находятся в интервалах $[(2n+1)\pi; (2n+2)\pi], n \in \mathbb{Z}$, будет всегда активирована функция $G(t)$. Функции $F(t)$ и $G(t)$ всегда должны формировать один общий период T' . Время смены полупериода $[2n\pi; (2n+1)\pi]$ на полупериод $[(2n+1)\pi; (2n+2)\pi]$ – это время $t_1=t_n$, где функция $\sin(A't)=0$. Время смены полупериода $[(2n+1)\pi; (2n+2)\pi]$ на полупериод $[2n\pi; (2n+1)\pi]$ – это время $t_k'=t_0$, где функция $\sin(A't)=0$ (смотрите рисунок 6).

Если не поступают кванты информации в нейроны Nd в полупериоде работы функции $F(t)$, то договоримся, что полупериод функции $F(t)$ будет завершен в момент времени непоступления квантов информации. Это вытекает из основного условия работы функции $F(t)$ – ее непрерывность. В момент времени, когда функция $F(t)$ прервется, будет запущена функции $G(t)$, у которой также изменится полупериод работы.

Ключевое правило работы функции $F(t)$ и функции $G(t)$ – это равенство их полупериодов в рамках общего периода T' . Размер полупериода работы функции $F(t)$, всегда определяет размер полупериода работы функции $G(t)$. Таким образом, текущий период функции $\sin(A't)$ зависит от поступления квантов информации из центральной нейронной сети или от других внутренних систем.

Периоды функции $\sin(A't)$ зависят не только от поступления квантов информации, но и от внутреннего информационного состояния нейронов Nd. Нейроны Nd подчиняются функции $F(t)$, а значит, теория может определить значение коэффициента адаптации A' , используя уравнение 10. Договоримся, что текущие значение коэффициента адаптации A' , определяют текущий период T' функции $\sin(A't)$, где $T'=2\pi/A'$. Таким образом, каждый период в нейроне Nd, будет зависеть от его текущего внутреннего информационного состояния и поступления квантов информации, что обеспечит формирование нового информационного свойства внутри нейронной сети.

Значение функции $F(t)$ в нейронах Nd зависит от значения временного интервала синхронизации T и от условия STDP ($T \neq 0$). Соответственно, функция $F(t)$ в нейронах Nd определяется уравнением 6, а функция $G(t)$ определяется уравнение 2.

Выводы:

- В идеальном нормальном информационном состоянии у функции $\sin(A' \cdot t)$ период $T' = 2\pi = \text{const}$, так как $A' = 1$. В таком случае будет наблюдаться “идеальная” работа внутреннего органа или внутренней системы.
- Если в нейронах N_d осуществляется быстрый переход от функции $F(t)$ к $G(t)$, то есть $A' > 1$, тогда внутренний орган или внутренняя система испытывают возбуждение. Наблюдается уменьшение периода работы, что увеличит частоту смены функций $F(t)$ и $G(t)$ в нейроне N_d . А это может привести к разным процессам в центральной нейронной сети: улучшению синхронизации или рассинхронизации между нейронами N_d и нейронами N_m, N_n .
- Если в нейронах N_d осуществляется медленный переход от функции $F(t)$ к функции $G(t)$, то есть $A' < 1$, тогда внутренний орган или внутренняя система испытывает торможение. Наблюдается увеличение периода работы, что уменьшит частоту смены функций $F(t)$ и $G(t)$ в нейроне N_d . Это также может привести к разным состояниям: синхронизации и рассинхронизации информационных процессов.
- Благодаря нейронам N_d и нейронам центральной нейронной сети, возможно сформировать аналог автономной нервной системы: парасимпатическая и симпатическая нервная система.
- Внедрение в информационные процессы внутренние системы, обеспечит формирование аналога метода распространения обратной ошибки и градиентного спуска, который используется в искусственных нейронных сетях. Но нейроны N_d не настраивают коэффициенты синаптических сил, как это делается в искусственных нейронных сетях, которые методом распространения обратной ошибки корректируют веса. Нейроны N_d преобразуют информацию, которая может стабилизировать или дестабилизировать существующий информационные процессы в центральной нейронной сети.
- Внутренние системы формируют уникальную информацию, которая отличается от информации в центральной нейронной сети из-за особенности работы функций $F(t)$ и $G(t)$. Уникальность информация в том, что нейроны N_d способны передавать в центральную нейронную сеть интегрированную информацию, в которой участвует информация о изменении внутреннего состояния системы или органа (период функции $\sin(A' \cdot t)$). Теория предполагает, что эти новые интегральные формы информации могут обеспечить последующие формирование психических, эмоциональных и физических состояний в центральной нейронной сети, которые наблюдаются у живых организмов.

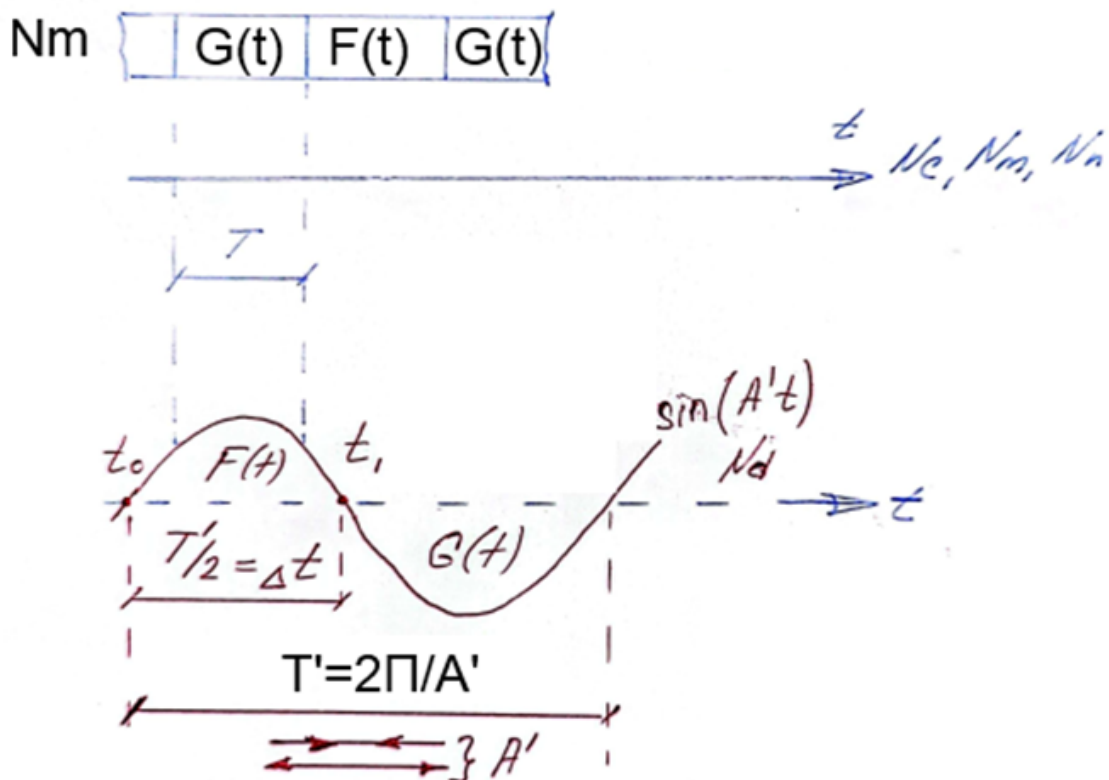


Рисунок 6. Графическое представление временной функции $\sin(A't)$. Сверху представлено линейное абсолютное время t , которое определяет все информационные события внутри всей нейронной сети. Например, сверху представлен нейрон N_m и его временная лента из чередующихся функций $F(t)$ и $G(t)$. Данный нейрон N_m принадлежит центральной нейронной сети и связан $j(i)$ вектором с нейроном N_d внутреннего органа. У нейрона N_d время работы стандартных функций $F(t)$ и $G(t)$ относительно, которое определяется временной функцией $\sin(A't)$. На рисунке 6, геометрически представлена временная синхронизация T нейронов N_m и N_d , что демонстрирует о передачи информации из центральной нейронной сети во внутренний орган. Пунктирная линия абсолютного времени t и наложенная на нее функция $\sin(A't)$, демонстрирует постоянную жесткую связь между этими временными процессами.

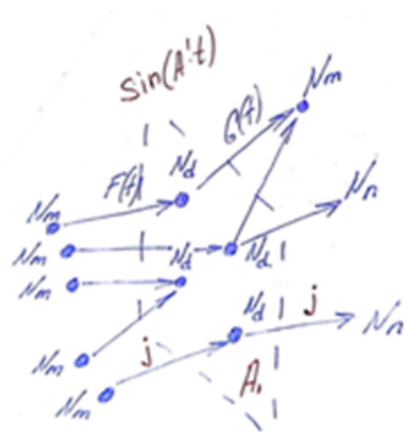
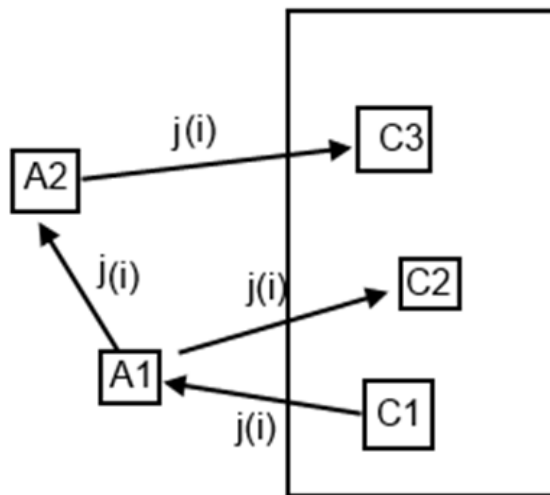


Рисунок 7. Схематическое представление архитектурной связи центральной нейронной сети и внутренних органов, где блоки C_i – это специализированные отделы центральной нейронной сети, например, гипоталамус, ядра ствола мозга, средний мозг и другие отделы мозга. Блоки A_i – это внутренние органы и внутренние системы. Нервные пучки волокон представлены в виде множества векторов $j(i)$.

6. Параметры информации.

Квант информации – это минимальная информационная единица теории. Множество квантов информации, которыми обменивается пресинаптический нейрон с постсинаптическим, будем называть параметрами. Теория будет оперировать двумя типами параметров: $P_i(t)$ и $P_j(t_1)$.

Параметр $P_j(t_1)$ – это критическая порция квантов информации, которая образуется в постсинаптическом нейроне в момент времени t_1 .

Параметр $P_i(t)$ – это порция квантов информации, которая поглощается постсинаптическим нейроном во временном интервале синхронизации T . Параметр $P_i(t)$ может существовать только при выполнении условия $STDP(T \neq 0)$.

В момент времени $t_1 = t_n$ постсинаптический нейрон всегда переходит в статус пресинаптического нейрона, и параметр $P_j(t_1)$ разбивается на множество равных долей, согласно условия работы функции $G(t)$. Множество равных долей параметра $P_j(t_1)$, будет равно количеству исходящих синапсов из пресинаптического нейрона, согласно условия работы функции $G(t)$. Из долей параметра $P_j(t_1)$ формируются параметры $P_i(t)$, значение которых определяет временной интервал синхронизации T . Далее параметры $P_i(t)$ интегрируются функцией $F(t)$ и формируют один параметр $P_j(t_1)$ в постсинаптическом нейроне.

$$P_j(t_1) = F(t_1), \text{ уравнение 19}$$

$$P_i(t) = \int_{T_0}^{T_1} K_i * C(i) * E_i(T) dT, \text{ уравнение 20}$$

Где

$E_i(T)$ – это количество квантов информации, которые получит постсинаптический нейрон в течении временного интервала синхронизации T , где $T = T_1 - T_0$.

T – это значения временного интервала синхронизации между пресинаптическим и постсинаптическим нейроном, в конкретном i синапсе.

Параметры $P_i(t)$ и $P_j(t_1)$ зависят от значения коэффициентов синаптических сил (уравнение 6 и 20), а значит зависят от механизмов синаптической пластичности LTP и LTD. Если внешний или внутренний стимул разложить на множество признаков, то можно предположить, что параметр $P_j(t_1)$ состоит из разного набора признаков стимула. А так как параметр $P_j(t_1)$ формируется из параметров $P_i(t)$, то можно предположить, что признаки стимула скрыты в параметрах $P_i(t)$.

7. Механизм “внимания”.

Механизм “внимания” играет важную роль для нейронной сети, так как он выделяет те информационные процессы, на которых должна фокусироваться нейронная сеть. Например, в существующих языковых моделях, такие как ChatGPT, основным механизмом архитектуры трансформеров является Self-attention (механизм “внимания”).

Теория предполагает, что механизм “внимания” реализуется в теории в момент перехода от функции $F(t)$ в функцию $G(t)$, когда наблюдается самая большая концентрация квантов информации в нейроне. Соответственно, параметры $P_j(t_1)$ - это маркер механизма “внимания”. У параметров $P_j(t_1)$ можно выделить две ключевые характеристики: количество квантов информации и время появления параметра $P_j(t_1)$, которое обратно пропорционально частоте спайка в нейроне (уравнения 8).

Возникает проблема: в нейронной сети множество спайков, у которых разные ключевые характеристики параметра $P_j(t_1)$, что усложняет механизму “внимания” выделить важный информационный процесс. По этой причине, крайне важен процесс синхронизации нейронов внутри нейронной сети. Нейронная синхронизация позволяет механизму “внимания” выделять группы нейронов, у которых похожи характеристики параметров $P_j(t_1)$ по частоте спайка, что делает их неотличимыми для механизма “внимания”, но при этом весь фокус внимания будет на синхронизированных нейронах, так как они имеют большое суммарное количество квантов информации. Тем самым механизм “внимания” может различать приоритетные информационные процессы от второстепенных.

Нейронная синхронизация – это способ объединения группы нейронов, которые могут обрабатывать одну конкретную информацию. Групповая частота синхронизации нейронов, с большой вероятностью, должна находиться в каком-то допустимом интервале частот. Например, в исследовании "Maximal Variability of Phase Synchrony in Cortical Networks with Neuronal Avalanches" Hongdian Yang , Woodrow L Shew(https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3319677/?utm_source=chatgpt.com) демонстрируется, что синхронизация между нейронными группами характеризуется вариабельностью фазовой синхронизации. Это указывает на то, что нейронная синхронизация не является статичной и может изменяться с течением времени. В другой работе "Fluctuations in Oscillation Frequency Control Spike Timing and Synchronization in Neuronal Networks" Michael X Cohen (https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6608248/?utm_source=chatgpt.com) показано, что изменения частоты осцилляций влияют на временную точность спайков и синхронизацию в нейронных сетях. Это подтверждает, что синхронизация нейронов сопровождается флуктуациями частоты, а не фиксированной частотой для всех нейронов.

Предположим, что для каждого стимула может существовать определенный интервал частот нейронов в пространственном месте нейронной сети, который можно выразить как $f' = f'' \pm \Delta f'$

Где

f' - текущая частота постсинаптического нейрона.

f'' – эталонная частота групповой синхронизации нейронов.

$\Delta f'$ - допустимое отклонение от эталонной частоты.

Это утверждение согласуется с анализом уравнений теории: в относительном равновесном состоянии выполняется условие, где $\Delta C(i) \rightarrow 0$ (уравнение 7.6), что обеспечивает незначительные изменения $C_i(t)$ и стабилизирует количество получаемых квантов информации постсинаптическим нейроном. А значит, у постсинаптического нейрона должно наблюдаться относительно стабильное время возбуждения, что соответствует относительно постоянной частоте нейрона, которую можно представить как $f' = f'' \pm \Delta f'$.

Запишем уравнение механизма “внимания”:

$$S(f') = \int_{f'' - \Delta f'}^{f'' + \Delta f'} F_i(f', t_1) d(f') , \text{ уравнение 21}$$

Где

$F_i(f', t_1)$ - значение функции $F(t)$ в постсинаптическом нейроне в момент времени t_1 , если значение частоты нейрон находится в допустимом частотном интервале $[f'' - \Delta f'; f'' + \Delta f']$.

Недостатком уравнения 21, является отсутствие математического определения эталонной частоты синхронизации нейронов, допустимого отклонения от эталонной частоты и пространственное положение синхронизированных нейронов. Соответственно, уравнение 21 требует дополнений или изменений.

Преимуществом уравнения 21, является математическая простота и определение количества квантов информации, в допустимом интервале частот спайков синхронизированных нейронов.

8. Память.

Ключевым механизмом обработки информации является механизм синаптической пластичности. В результате действия стимула, механизм синаптической пластичности стремится как можно быстрее сформировать относительные равновесные состояния в синапсах между пресинаптическими и постсинаптическим нейроном, что стабилизирует движение информации.

Все описанное выше в теории согласуется с памятью, которая постоянно реконструируется под воздействием внешних и внутренних стимулов.

Такой вид памяти имеет ряд преимуществ:

1. Оптимизация пространства нейронной сети.
2. Решение проблемы переобучения, что присутствует в искусственных нейронных сетях.
3. Возможность полного или частичного восстановления памяти из разных пространственных мест нейронной сети. Для этого нужно использовать определенный набор стимулов или стимул, наличие которых в определенном пространственном месте нейронной сети способны дальше восстановить информацию. В таком случае, существует высокая вероятность частичного или полного восстановления памяти.

Недостаток:

1. Относительное равновесное состояние зависит от времени его формирования.
2. Память зависит от стимулов.
3. Серьезные функциональные изменения в синаптических связях могут препятствовать реконструкции памяти, такие как удаление или добавления множества синапсов.

9. Анализ, предположения, выводы.

Фундаментальное свойство нейронов –это интеграция и распараллеливание информации.

Интеграция и распараллеливание информации – это фундаментальное свойство, которое реализовано в каждом нейроне. Например, один постсинаптический нейрон интегрируют информацию от множества пресинаптических нейронов, через общие синапсы. А один пресинаптический нейрон распараллеливает информацию на множестве постсинаптических нейронов, через общие синапсы. Это утверждение согласуется с морфологическим устройством биологических нейронов и архитектурным устройством нейронов в теории, где регулирует процесс интеграции функции $F(t)$ и $H_i(t)$, а процесс распараллеливания регулирует функция $G(t)$.

Вероятность синхронизации между пресинаптическим и постсинаптическим нейронами возрастает по мере приближения к относительному равновесному состоянию в их синапсах. Относительное равновесное состояние в синапсах зависит от коэффициентов синаптических сил. Изменяющиеся коэффициенты синаптической силы $C_i(t)$ в синапсе, меняет пропускную способность информации в каждом синапсе. Когда коэффициент синаптической силы $C_i(t)$ начинает незначительно изменяться, то значение $\Delta C(i)$ минимальное (уравнение 7.6). Следовательно, движение информации через синапсы стабилизируется и пресинаптический нейрон синхронизируется с постсинаптическим нейроном.

Процесс синхронизации играет важную роль как для пары нейронов: пресинаптический и постсинаптический, так и для групп нейронов, например, альфа, бета, гамма ритмы.

Есть примеры с физического мира, которые косвенно могут подтверждать предположение теории. Например, колебательные системы, такие как часы или маятники, синхронизируются через общую среду (например, звуковую или механическую связь). При стабилизации параметров взаимодействия, аналог $C_i(t)$, колебания приходят в фазу. Аналогично нейронам, синхронизация наступает при минимальных изменениях параметров взаимодействия, таких как $\Delta C(i) \rightarrow 0$.

Лазерные массивы демонстрируют фазовую синхронизацию, когда параметры усиления и фазы стабилизируются. Это происходит, когда изменение этих параметров становится минимальным, например как $\Delta C(i) \rightarrow 0$. Лазеры синхронизируют свои фазы, аналогично тому, как нейроны синхронизируются через стабилизированные коэффициенты синаптических сил.

Кардиомиоциты (клетки сердечной мышцы) синхронизируют свои сокращения для поддержания устойчивого сердечного ритма. Это происходит через электрические сигналы, передающиеся через межклеточные соединения. Взаимодействие между кардиомиоцитами регулируется "проводимостью" соединений, аналог $C_i(t)$. Когда проводимость стабилизируется, например $\Delta C(i) \rightarrow 0$, то клетки достигают устойчивого ритма.

Причинно – следственная связь и синхронизация нейронов. Известный факт: если причина – это временное событие t , то следствие – это временное событие $t+1$. Теория утверждает, что чем выше синхронизация интегрируемой информации в рамках общего информационного процесса, тем меньше вероятность образовать причинно-следственные связи между интегрируемой информацией.

Рассмотрим гипотетический пример.

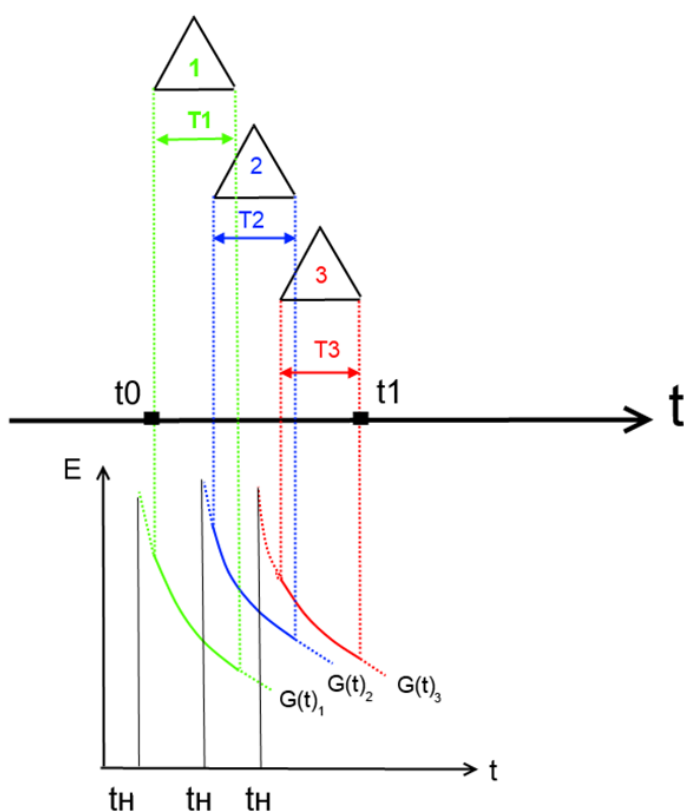


Рисунок 8. Временная последовательность параметров $P_i(t)$. На рисунке 8, графически в виде треугольников представлены параметры $P_i(t)$, где номер в треугольнике обозначает номер параметра $P_i(t)$.

Допустим, есть 3 параметра $P_i(t)$ в разных синапсах, которые формируют спайк в постсинаптическом нейроне, как продемонстрировано на рисунке 8. Все 3 параметра имеют свой уникальный временной интервал синхронизации $T_i = T_1 - T_0$. Все 3 временных интервала синхронизации T_1, T_2, T_3 имеют разное временное положение относительно абсолютной временной шкалы t , что формирует временную последовательность поступления квантов информации в постсинаптический нейрон, которые содержатся в параметрах $P_i(t)$.

Предположим, что мы поменяем во времени местами параметры 2 и 3. Тогда у параметров 2 и 3 изменятся положения в условных зонах (уравнения 7.1-7.3 и рисунок 5), а это значит, что изменится количество квантов информации в функции $E_i(t)$, уравнение 3. Изменение значения функции $E_i(t)$, изменит значение самого параметра

$P_i(t)$, уравнение 20, что может измениться интервал времени возбуждения постсинаптического нейрона t_1-t_0 . Изменение интервала времени возбуждения постсинаптического нейрона, изменит время t_1 , а значит изменит частоту f . Соответственно, изменятся ключевые характеристики информации (параметра $P_j(t_1)$) – количество квантов информации и частота, что изменит информацию в постсинаптическом нейроне - изменится параметр $P_j(t_1)$. Следовательно, если 3 параметра $P_i(t)$ были рассинхронизированы между собой, то во время интеграции нужно учитывать временную последовательность интеграции каждого из параметров $P_i(t)$.

Изменим начальные условия: допустим, 3 параметра $P_i(t)$ будут синхронизированы. Тогда время t_n у 3 пресинаптических нейронов, которые образуют параметры $P_i(t)$, будет очень похожие. А это значит, что интервалы временных синхронизаций T_1-T_3 занимают одинаковые условные зоны, и начальный момент времени t_0 у параметров очень похожий. В таком случае, не зависимо какое значение будет T у параметров и какое временное положение относительно друг друга будут занимать эти параметры. Как бы мы не меняли временное положение параметров $P_i(t)$ относительно друг друга, мы всегда будем иметь практически одинаковое время возбуждения в постсинаптическом нейроне. Итоговый параметр $P_j(t_1)$ в постсинаптическом нейроне будет изменяться в пределах допустимых значений, что не изменит информацию. Следовательно, теория утверждает, что во время синхронизации отсутствует причинно-следственная связь разных информационных параметров, которые участвуют в общем интеграционном процессе.

Например, в условиях эпилептического приступа наблюдается сильная синхронизация электрической активности мозга. Это приводит к потере специфической причинной связи между отдельными нейронными группами, и уменьшению разнообразия состояний: весь мозг работает в унисон, подавляя локальные информационные процессы.

Усложнение информации и ее абстрактные формы. Существует разные подтвержденные данные, которые демонстрируют, что преобразование информации в глубоких слоях нейронной сети (биологической или искусственной), наблюдается усложнение информации и формирование все более абстрактных видов информации.

Например. В исследовании "Evaluation of the Hierarchical Correspondence between the Human Brain and Artificial Neural Networks: A Review" Trung Quang Pham, Teppei Matsui (<https://www.mdpi.com/2079-7737/12/10/1330>) происходило моделирование мозговой активности с помощью искусственных нейронных сетей и установлено, что информация иерархически организована и в человеческом мозге. Так, в зрительных и других сенсорных областях мозга, каждый уровень обработки отвечает за более высокую степень абстрагирования, от распознавания текстур до сложных паттернов и комбинаций признаков.

Пример в искусственных нейронных сетях. В искусственных сверточных нейронных сетях (CNN), где методом линейного математического преобразования исходной матрицы и матрицы фильтра, с последующим нелинейным преобразованием (активация нелинейной функцией ReLu), приводит к выделению нужного признака и формированию нового информационного состояния исходной матрицы. Этот процесс называется сверткой, где каждая свертка выделяет свой уникальный признак, на который настроен конкретный фильтр. Результирующая матрица свертки будет содержать более абстрактную информацию, в отличие от предыдущей результирующей матрицы, что позволит новому фильтру выделить новый и более сложный признак. Чем абстрактнее становится информация, тем она меньше напоминает первоначальную информацию.

Связь примеров с теорией. В теории нет свертки и нет матрицы, что наблюдается в сетях CNN. В теории процесс интеграции информации использует линейную функцию $F(t)$, которая является аналогом линейного преобразования исходной матрицы и матрицы фильтра в сетях CNN. После достижения порогового значения функции $F(t)$, информацию преобразует нелинейная функция $G(t)$, которая является аналогом нелинейной функции активации, на примере ReLu. Теория предполагает, что такая схема преобразования информации, которая представлена чередующимися функциями $F(t)$ и $G(t)$, должна преобразовывать информацию и делать ее абстрактной. Другими словами, начальный импульс, который содержит стимул и активирует нейроны, при достижении нового нейрона (нейронов) будет происходить информационное преобразование начального стимула, и его информационная форма будет становиться все более абстрактной.

Появление абстракций и сложных форм информации в глубоких слоях нейронной сети, создают фундаментальную проблему: как повторно их воспроизвести в будущем?

По предположению теории, ответ нужно искать в механизме интеграции параметров $P_j(t)$ и способе увеличения их разнообразия. Идея следующая: естественная окружающая среда способна сформировать определенное количество параметров $P_j(t)$ и их интеграций, но человек искусственным образом их расширил – символы, цифры, слова и другое.

Вывод. Теория сознания и кванты информации принципиально отличается от других теорий тем, что она пытается описать фундаментальные механизмы, которые участвуют в формировании сознания. Сильная сторона теории – это ее фундаментализм, математическое описание, связанность математических параметров между собой и оптимизация биологических процессов, которые участвуют в информационной обработке.

Далее необходимо изучить как протекают информационные процессы на больших масштабах: группы нейронов. Для этого нужно выявить закономерности и

уникальности архитектуры нервной системы человека. Описать процесс синхронизации и интеграции информации на масштабе всей нейронной сети, это возможно позволит не просто связать все механизмы в один процесс, а выявить производные механизмов описанных в теории, которые по особенному проявляются на больших масштабах.