

Моделирование процессов выживания и оптимизации ресурсов нейрона как элемента самоорганизующихся динамических нейронных структур

Оглавление

Введение	2
1. Интеллектуальная квазибиологическая система	3
2. Формулировка задачи работы	11
3. Функциональная схема комплексной модели нейрона.....	12
4. Модель процессов жизнеобеспечения нейрона	14
4.1. Износ нейрона	14
4.2. Баланс энергии нейрона	14
4.3. Модель самочувствия нейрона	16
4.4. Модель порога генераторной зоны нейрона	17
5. Интегральные характеристики нейронной сети	17
6. Правила организации нейронных связей	18
6.1. Модель организации связей нейронов.....	18
6.2. Выражение коэффициентов связей через параметры ожидаемых реакций нейронов сети	19
7. Многослойные сети	21
8. Исследования	22
8.1 Параметры одиночного нейрона	22
8.2. Исследования сети	24
8.3. Организация связей в сети	27
8.4. Функционирование сети под действием внешнего возбуждения	28
8.5. Исследование ансамблей	31
Заключение.....	34
Список использованных источников.....	35

Введение

Многие подходы в решении задач, которые традиционно считаются прерогативой человеческого интеллекта, нашли подсказки или целиком были позаимствованы у живых существ и человека. Можно полагать, что человеческое мышление это построение образной картины решаемой задачи, решающую роль в построении образов играют ассоциации между множествами образов. Процесс мышления - это обработка образной информации, манипулируя которой, двигаясь от образа к образу, человек решает различные задачи [1].

Однако моделирование столь сложной структуры как нервная система животных и человека “в лоб”, с целью получить систему, обладающую способностями аналогичными тем, что считаются прерогативой человеческого интеллекта, представляется не перспективным. В отсутствие достоверных и исчерпывающих знаний о причинах именно такой организации структуры и функций мозга, какие они есть, потребовалось бы создать точную копию мозга, что не имеет смысла в перспективе создания робототехнических систем.

Один из возможных путей создания систем образной обработки информации – попытаться путем анализа известных принципов организации и взаимодействия естественных нейронов предложить модель, объединяющую в себе эти принципы. Такой путь является продолжением теории искусственных нейронных сетей.

Более перспективным направлением, представляется попытаться понять проанализировать первопричины, по которым нейроны объединяются в группы, слои, и затем формируют отделы мозга, и попытаться создать модели нейронов и нейронных сетей, функционирующие по сходным принципам. Иными словами необходимо попытаться то движущее начало, которое формирует нейронные структуры и их заставляет работать. Одним из таких фундаментальных свойств в живой природе является принципиальная неустойчивость биологической системы во времени – т.е. неизбежное старение организма. Борьбу с этим свойством можно считать одним из основных аспектов функционирования живой материи [2].

Внесение в модели нейронов и нейронных сетей этого, и других свойств

живой материи может позволить создать системы, в которых такие важные аспекты как образное восприятие и обработка информации будет являться следствием этих свойств, а не заложено искусственно. Также исследование таких моделей, возможно, позволит полнее понять принципы функционирования высшей нервной деятельности человека.

1. Интеллектуальная квазибиологическая система

Важную роль в функциональных системах играют мотивации, связанные с потребностями организма. В поведении животных мотивация служит для формирования цели и поддержки целенаправленных форм поведения. Ее можно рассматривать как активную движущую силу, которая стимулирует нахождение решения, адекватного потребностям животного в конкретной ситуации. Например, если организм голоден, он должен искать пищу.

В работе [2] предлагается модель нейронного автомата, состоящая из нейронов, рецепторов, эффекторов и системы раздачи питания нейронам. Нейроны автомата отдаленно напоминают живые нейроны. Рецепторы воспринимают воздействия внешней среды, в которой находится автомат, и преобразуют их в воздействия на нейроны. Эффекторы воспринимают воздействия нейронов и преобразуют их в воздействия на внешнюю среду.

Основные особенности:

1. Нейрон нуждается в питании. Если нейрон не получает требуемого ему количества питания, то он погибает.

2. Нейрон стареет. Состояние нейрона зависит от его возраста. Основным свойством является рост потребностей в питании по мере увеличения возраста.

3. Разряд в нейроне приводит к снижению возраста и к снижению потребностей в питании.

4. Между нейронами могут образовываться связи, по которым осуществляется взаимодействие нейронов, направленное на оптимизацию функциональных состояний нейронов.

5. Разряд в нейроне требует дополнительных расходов питания, зависящих от частоты генерации разрядов. У нейрона существует оптимальная частота генерации, такая, при которой расходы питания на единицу снижения возраста минимальны.

6. У нейрона имеются собственные внутренние резервы питания. По их величине и тенденции определяется "самочувствие" нейрона.

В начале функционирования автомат - это неорганизованное или слабо организованное множество нейронов, поставленных в условия ограниченного питания. Решается задача выжить за счет организации таких внутренних отношений между нейронами и отношений с внешним миром, когда потребности нейронов снижаются и в среднем автоматически поддерживаются на уровне возможностей питательной среды. Интеллектуальные свойства возникают как следствия организации различных энергетически выгодных форм и режимов внутреннего функционирования.

В исходном состоянии нейроны функционируют независимо друг от друга, так как связей между ними еще нет. Свойства нейронов обеспечивают образование межнейронных связей, и неорганизованное нейроны превращаются в нейронную сеть с самоподдерживающейся структурой, определяемой числом и величинами межнейронных связей. Это происходит для функционального обновления, т.е. значительного снижения возраста всех нейронов и снижения потребностей в питании.

Модель нейрона, удовлетворяющего требованиям, описанным выше, может быть представлена следующей функциональной схемой (рис. 1.1).

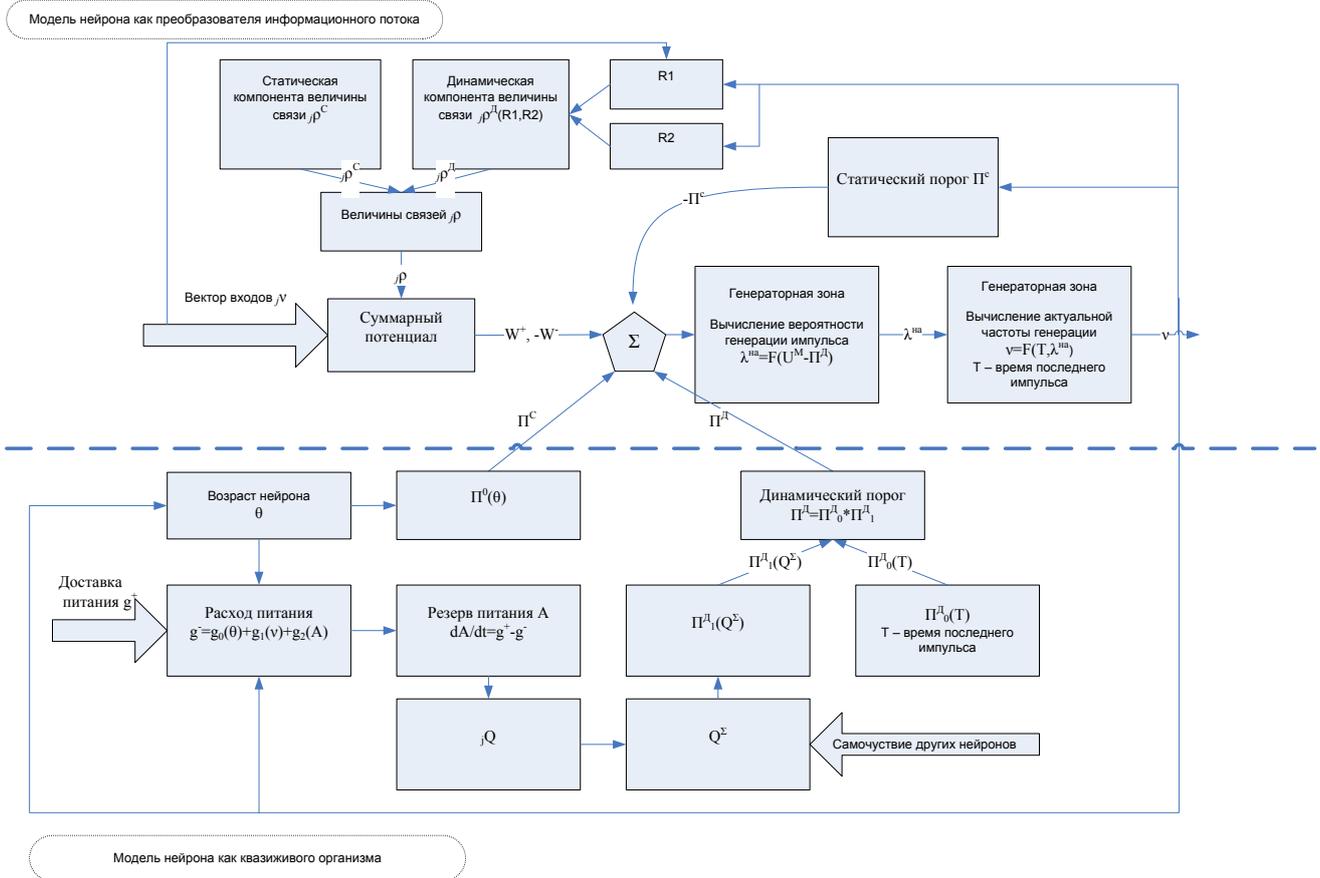


Рис. 1.1. Модель нейрона как квазибиологического организма

Ниже и до конца параграфа представлены выдержки из работы [2] с некоторой интерпретацией.

Главными переменными нейрона являются: резервы нейрона, возраст нейрона, самочувствие нейрона, динамический порог, статический порог нейрона, возбуждающий потенциал, тормозной потенциал нейрона. iA - резерв питания у i -го нейрона. $i g^+$ - питание, которое нейрон получает за единицу времени; $i g^-$ - питание, которое нейрон тратит за единицу времени.

Тогда разница этих значений определяет изменение собственных внутренних резервов питания в нейроне: $dA/dt = i g^+ - i g^-$. Если $iA > A1$, то возможно размножение; если $iA < A2$, то возможна смерть; если $iA < 0$, то смерть неизбежна, причем $A1$ и $A2$ константы.

Возраст нейрона - это обобщенный показатель внутреннего состояния нейрона. При разрядах в нейроне возраст снижается. При большом значении возраста, возбудимость может вызвать разряд в нейроне.

Помимо направленного влияния через связи, нейроны могут влиять друг на друга ненаправленно. Если источником направленного влияния служит разряд, то источником ненаправленного влияния нейрона j на прочие служит параметр ${}_jQ$, зависящий от состояния нейрона j . Этот параметр будем называть самочувствием нейрона j .

Воздействие на любой нейрон определяется одной и той же величиной, полученной из самочувствий всех нейронов. Она называется самочувствием автомата.

Самочувствие влияет на условия возникновения разрядов в нейронах и на величины связей.

Π^d — динамический порог нейрона; Π^c — статический порог нейрона; W^+ — возбуждающий потенциал на нейроне; W^- - тормозной потенциал на нейроне.

Динамический порог нейрона показывает влияние на возбудимость нейрона ближайшей его предыстории. Сразу после разряда порог резко растет, потом некоторое время возбудимость остается существенно пониженной, после чего оказывается на некоторое время повышенной по сравнению с состоянием покоя.

Статический порог нейрона показывает влияние на возбудимость нейрона его оперативной предыстории, то есть последней серии разрядов в нем. Чем больше Π^c , тем меньше возбудимость.

iW^+ - это возбуждающий потенциал на i -м нейроне, то есть внешнее возбуждение на нейроне i , созданное в результате генерации других нейронов и рецепторов, от которых на нейрон i имеются возбуждающие связи. С течением времени возбуждающий потенциал уменьшается, стремясь к нулю.

Тормозной потенциал нейрона во всем работает так же, как и возбуждающему, только не возбуждает, а тормозит нейрон.

Размерность у переменных Π^d , Π^c , W^+ и W^- одинакова.

Поведение во времени статической компоненты связи можно описать уравнением

$$d\rho^c/dt = kR_3\rho^d - \mu^c\rho^c$$

в котором k — константа; R_3 — функция от $Q\Sigma$, реализующая поощрение; μ^c — функция от ρ^c , график которой показан на рис. 1.2.

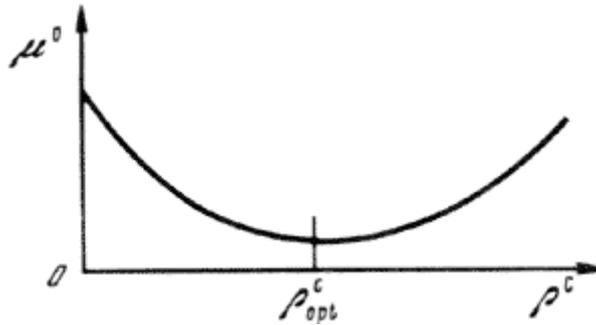


Рис 1.2. Зависимость μ^c от ρ^c

Когда ρ^c близко к некоторому значению ρ_{opt} — константе, то темп рассасывания статической связи (величина, обратная времени усреднения) имеет наименьшее значение. Связь, близкая к ρ_{opt} , меняется очень медленно. Как большая, так и малая связь быстро уменьшаются. Таким образом, если в результате усреднения по большому числу серий разрядов статическая связь оказалась малой по сравнению с ρ_{opt} , то память об этом сохранится недолго. Если же ρ оказалось больше ρ_{opt} , то связь, снизившись до уровня ρ_{opt} , надолго сохранится. Если оказывается $\rho < 0$, то связь перестает работать, т.е. воздействие по такой связи не передается.

Поведение во времени динамической компоненты связи можно описать уравнением

$$d^j_{i\rho^d}/dt = jR_1 \cdot iR_2 - \mu^d \cdot j_{i\rho^d}$$

в котором μ^d — темп рассасывания динамической связи — константа, существенно большая, чем μ^c .

Величина R_1 характеризует способность нейрона изменять связи на другие нейроны. Она зависит от режима работы нейрона, дающего связь:

$$dR_1/dt = \gamma_{1v} - \mu_{1^d} R_1$$

Здесь γ_1 и μ_1^d — константы; ν — частота генерации нейрона, от которого идет возбуждение. Способность изменять связи на другие нейроны возрастает, когда нейрон генерирует, и рассасывается после прекращения генерации.

Величина R_2 характеризует способность нейрона изменять связи от других нейронов на него. Она зависит от режима работы нейрона, принимающего связь:

$$dR_2/dt = \gamma_{2\nu} (\nu_{opt} - \nu) - \mu_2^d R_2$$

Здесь γ_2 , μ_2^d , ν_{opt} — константы; ν — частота генерации нейрона, на который приходит возбуждение. Генерация нейрона увеличивает R_2 , если частота генерации ниже оптимальной, и уменьшает в противном случае.

Длительная сверхвысокочастотная генерация может сделать R_2 отрицательной величиной. Из-за этого и ρ^d может временно оказаться отрицательной величиной. С помощью фактора R_2 осуществляется, в частности, регулирование частоты генерации нейрона. Если эта частота длительно отличается от оптимальной, связи на данный нейрон изменяются в таком направлении, чтобы приблизить частоту к ν_{opt} . Как и в других случаях, в отсутствие собственной генерации способность изменять идущие от других нейронов связи утрачивается.

Если от нейрона j к нейрону i имеется возбуждающая связь, то разряд нейрона j тотчас увеличивает возбуждающий потенциал нейрона i . Это увеличение потенциала называется величиной возбуждающей связи и обозначается j_{ip}^+ . В промежутке между разрядами нейронов, посылающих возбуждающие сигналы нейрону i , его возбуждающий потенциал iW^+ рассасывается. Время рассасывания велико по сравнению с τ^e . Усредненное по интервалу порядка τ^e значение iW^+ описывается уравнением

$$d_iW^+ / dt = \sum_{j \in J_V} j_{ip}^+ - \mu^+ iW^+$$

Здесь μ^+ — константа, равная темпу рассасывания потенциала W^+ .

При постоянной частоте потенциал достигает равновесного уровня за время порядка $(\mu^+)^{-1}$. По окончании генерации сигнализирующих нейронов он экспоненциально

стремится к нулю за то же время. Тормозной потенциал подчиняется аналогичному уравнению

$$d_i W^- / dt = \sum_j j_{ij} W^- - \mu^- W^-$$

где j_{ij}^- — величина тормозной связи от нейрона j к нейрону i ; μ^- — константа.

Зависимость $\lambda^{на}$ от возраста нейрона θ представим как зависимость от некоторого "чистого" порога Π^0 , определяемого только значением θ , так, чтобы размерность $\Pi^0(\theta)$ была той же самой, что и остальных аргументов функции $\lambda^{на}$.

Возбудимость $\lambda^{на}$ представим как функцию от потенциала нейрона U :

$$\lambda^{на} = F(U),$$

где U - алгебраическая сумма: $U = W^+ - W^- - \Pi_0 - \Pi^c - \Pi^d$. Зависимость $\lambda^{на}$ от U носит пороговый характер : при $U > 0$ — это очень быстро (экспоненциально) растущая функция. Отрицательный потенциал уменьшает вероятность разряда, но не так резко, как положительный потенциал.

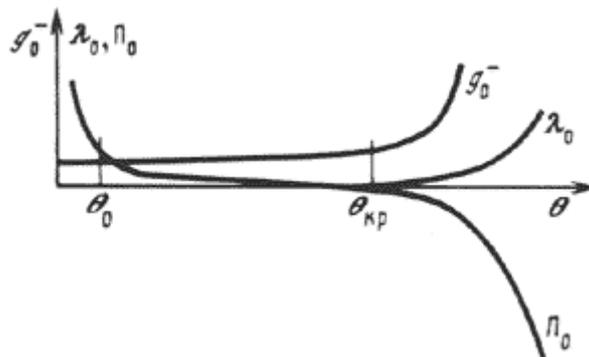


Рис 1.3. Зависимости $\lambda(\theta)$, $\Pi_0(\theta)$ и $g_0(\theta)$

На рис.1.3 можно заметить, что потребление начинает существенно возрастать раньше, чем начинает существенно возрастать вероятность разрядов, — в этом рабочая первопричина самоорганизации нейронов.

Разряд двойко сказывается на балансе питания: непосредственно уменьшает резерв на ΔA , но, омолаживая нейрон на $\Delta\theta$, уменьшает последующее потребление $g_0^-(\theta)$. Отношение $\Delta A / \Delta\theta$ — удельный расход резерва на омоложение — зависит от состояния нейрона перед разрядом. Это состояние резко меняется на интервале

времени порядка τ^3 после предыдущего разряда, что проявляется, в частности, в резком изменении Π_0^d . Расход на один разряд в зависимости от времени τ после предшествующего срабатывания нейрона, т.е. в зависимости от частоты генерации нейрона, показан на рис.1.4.

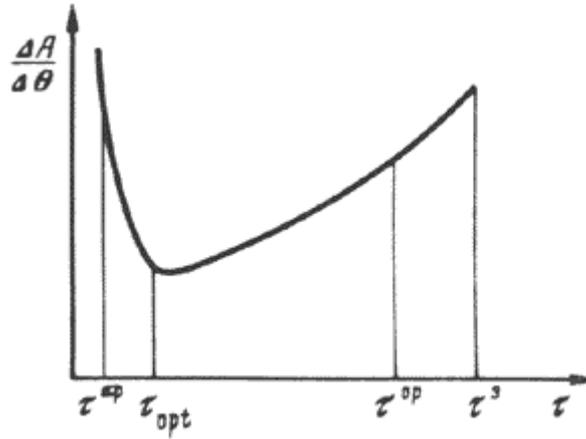


Рис 1.4 Зависимость удельного расхода резерва на омоложение от времени

Снижение возраста, т.е. омоложение нейрона, считаем для всех разрядов, кроме разрядов, завершающих серии, одинаковым. Тогда график на рис.1.8 будет также графиком зависимости удельного расхода резерва на омоложение от времени, прошедшего после предыдущего разряда: $\Delta A/\Delta \theta (t)$. Из рис.1.4 видно, что существует оптимальная частота

$$v_{opt} = 1/\tau_{opt}$$

при которой удельное потребление на омоложение минимально. Она несколько ниже предельной частоты $1/\tau^{op}$ и гораздо выше v_{min} .

Положение об оптимальной частоте генерации — одно из фундаментальных для концепции индуктивного автомата: нейронам выгодно работать на оптимальной частоте.

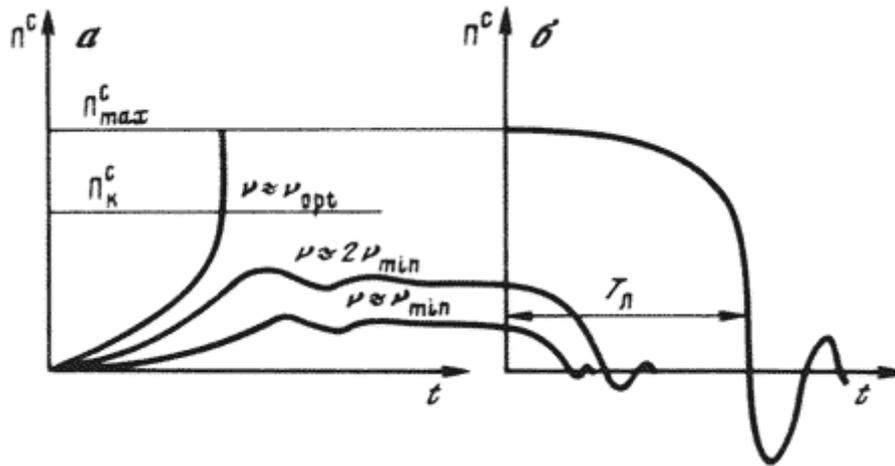


Рис 1.5. Изменение величины порога а — при генерации; б — в состоянии покоя

Значения Π^c зависят от того, как менялась частота генерации со временем (рис. 1.5):

$$d\Pi^c / dt = f(\nu, \Pi^c).$$

Если функция Π^c достигает при своем росте некоторого критического значения Π^c_k , то происходят ее резкое увеличение до максимального значения Π^c_{max} . Тогда при любых, реально возможных значениях θ и W^+ разряды в нейроне становятся невозможны. Достичь значения Π^c_k функция Π^c может лишь при больших частотах генерации. При малых частотах функция Π^c достигает некоторых, зависящих от частоты ν значений и далее практически не меняется.

Данная модель содержит в себе все необходимые алгоритмы для адаптации к образам внешней среды (запоминание), влияние на формирование мотивации поведения объекта, определение оценки текущего состояния объекта.

2. Формулировка задачи работы

Можно полагать, что интеллектуальное поведение животных связанное, несомненно, с функционированием нервной системы, которая является эволюционным механизмом приспособления компенсации неустойчивости процессов жизнедеятельности под воздействием факторов окружающей среды, таким образом, основано на первичных факторах, свойственных живым организмам, и необходим учет этих факторов в моделях интеллектуальных систем. При этом

учет этих факторов представляется разумным производить на уровне базовых функциональных элементов разрабатываемых искусственных систем, аналогично симбиозу взаимодействия отдельных клеток и органов, формирующих сложный живой организм.

Разработка систем, обладающих базовыми признаками живых объектов, таких как: старение, потребность в питании, наличие эмоций (краткосрочная и долгосрочная оценка внутреннего состояния организма и его взаимодействия со средой), представляется одним из перспективных направлений на пути создания робототехнических систем, способных адаптироваться к образам внешней среды, взаимодействовать со средой автономно и эффективно решая поставленные задачи в условиях сложной, и часто неопределенной обстановки, допускающей различные варианты поведения, или когда сама задача не имеет четко формализованной модели.

Первым этапом на пути создания таких систем может являться необходимость разработки модели нейрона, в основу которой будет положена нейронно-энергетическая концепция предлагаемая в модели, описанной в п. 1.

Как было показано на рис 1.1 , такую модель можно разделить на два функциональных модуля: модуль нейрона как преобразователя импульсного потока, и модуль нейрона как квазиживого объекта.

Целью данной работы является математическое описание, и разработка и исследование компьютерной модели функционала нейрона, как элемента самоорганизующихся динамических нейронных структур обеспечивающего его выживание в данных структурах во взаимодействии с окружающей средой, в условиях ограниченного времени существования нейронов и конкурентной борьбы за ресурсы.

3. Функциональная схема комплексной модели нейрона

Ниже представлена функциональная схема, объединяющая в себе модель нейрона как преобразователя импульсных потоков [3,4,5] и как живого объекта (рис. 3.1).

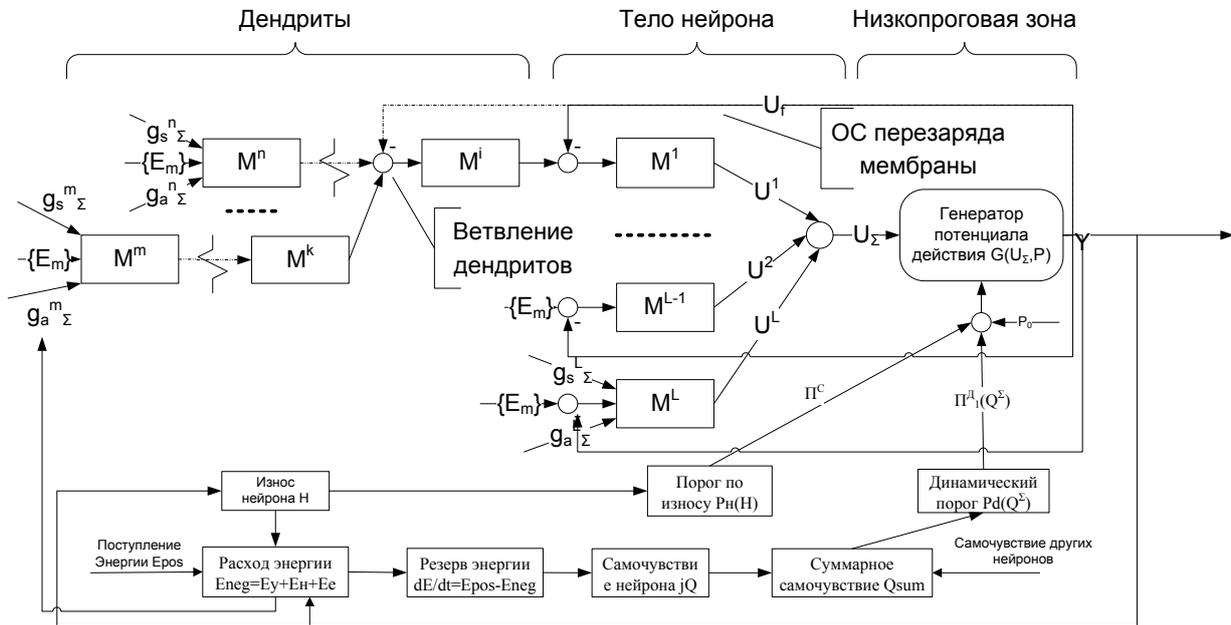


Рис 3.1 Функциональная схема комплексной модели нейрона

Моделируя процессы жизнеобеспечения нейрона, мы абстрагируемся от химии и физиологии протекающих процессов, аналогично моделированию процессов преобразования импульсных потоков. Нас интересует моделирование качественных свойств нейрона, обеспечивающих выживание клетки в условиях симбиоза и конкурентной борьбы внутри нейронной сети. Опираясь на работу [2] введем два следующих базовых параметра:

Энергетический резерв клетки E . Полагаем, что нейрон расходует энергию на генерацию импульсов. При наличии избытка энергии нейрон способен делиться, при потере всего запаса энергии нейрон погибает. Также полагаем суммарный запас энергии нейронной сети ограниченным.

Таким образом этот параметр ограничивает способность нейрона к генерации импульсов и является фактором конкурентной борьбы в сообществе нейронов.

Износ нейрона H определяет эффективность функционирования модели. Увеличение степени износа (старение нейрона) ведет к снижению эффективности

расхода энергии на генерацию импульса. Процесс генерации импульса ведет к функциональному обновлению клетки, т.е. снижению степени износа. Таким образом этот параметр определяет потребность клетки в симбиозе с другими клетками для экономии ограниченного запаса энергии.

4. Модель процессов жизнеобеспечения нейрона

4.1. Износ нейрона

Износ нейрона определяется его временем функционирования и активностью изменения мембранного потенциала. Будем считать, что износ увеличивается на заданную величину каждую секунду

$$H_+(t) = H_+^* \cdot t. \quad (4.1)$$

Вычитаем обновление нейрона за счет изменения мембранного потенциала (активности нейрона):

$$H_-(t) = H(t) \cdot \left[\frac{1}{1 + e^{-k_H |U_\Sigma(t)|}} - 0.5 \right] \cdot H_-^* \cdot t. \quad (4.2)$$

Получаем

$$H(t) = H_0 + H_+(t) - H_-(t), \quad (4.3)$$

где H_0 – начальное значение износа,

H_+^* – фиксированная прибавка к износу,

H_-^* – коэффициент обновления,

$k_H \in (0; \infty)$ – коэффициент эффективности обновления нейрона. Чем он выше, тем активность нейрона дает больший вклад в уменьшение износа, но не более чем $0.5 \cdot H \cdot H_-^* \cdot t$.

4.2. Баланс энергии нейрона

Энергетический резерв E равен разности между величинами поступления

энергии из общего резерва нейронной сети и суммарного расхода энергии на поддержание жизнедеятельности и генерации импульсов:

$$E(t) = E_+(t) - E_-(t). \quad (4.4)$$

Величина поступления энергии пропорциональна общему резерву сети E_Σ , и обратно пропорциональна числу нейронов в сети N : $E_+ \sim \frac{E_\Sigma}{N}$.

Положим:

$$E_+ = E_* \cdot \frac{E_\Sigma}{N}, \quad (4.5)$$

Где E_* - коэффициент, характеризующий степень важности этого нейрона для нейронной сети. В дальнейшем для простоты будем считать $E_* = const$.

Расход энергии $E_-(t)$ равен сумме расходов на генерацию импульса $E_y(t)$, на хранение резерва энергии $E_E(t)$ и потребление энергии на поддержание функционирования клетки, зависящей от степени износа $E_H(t)$:

$$E_-(t) = E_y(t) + E_E(t) + E_H(t). \quad (4.6)$$

Будем считать E_y пороговой функцией:

$$E_y(t) = |U_\Sigma(t)| \cdot E_{y0} \cdot t \quad (4.7)$$

Расход энергии на хранение энергетического резерва определим экспоненциальной функцией:

$$E_E(t) = E_{E0} \cdot e^{k_E \cdot E(t)} \cdot t \quad (4.8)$$

Полагаем, что расход энергии на хранение энергетического запаса по превышению некоторого критического значения запаса энергии E_{cr} , резко возрастает выходя из приблизительно линейной области. Таким образом становится невыгодно накапливать слишком большой запас энергии. Полагая E_{cr} таким, что $E_E(E_{cr}) = 2E_{E0}$,

получаем выражение для k_E : $k_E = \frac{\ln 2}{E_{cr}}$.

Расход энергии в зависимости от износа клетки определим как:

$$E_H(t) = E_{H0} \cdot (1 + e^{k_H \cdot H(t)}) \cdot t \quad (4.9)$$

Аналогично E_E , существует некоторое критическое значение износа H_{cr} , по превышении которого расход энергии существенно возрастает.

В случае если запас энергии нейрона E превышает заданный E_{max} , нейроны осуществляют деление. При этом имеющийся запас делится поровну между порождающим и порождаемым нейроном.

Таким образом, если количество энергии доступный сети – постоянно, то число нейронов сети не может существенно превысить некоторого N_{max} , определяемого начальным числом нейронов и количеством энергии сети, и достигаемым в период начального функционирования сети, когда износ нейронов близок к нулю.

4.3. Модель самочувствия нейрона

Самочувствием нейрона назовем функционал $Q = Q(E, \dot{E})$. Единственной задачей модели нейрона является максимизация данного функционала.

Положим: $Q = Q_1(E) + Q_2(\dot{E})$,

$$Q_1(E) = E - E_N,$$

$$Q_2(\dot{E}) = \left[\frac{1}{1 + e^{-k_Q \cdot \dot{E}}} - 0.5 \right] \cdot E_N,$$

где E_N - некоторое номинальное значение запаса энергии, при котором самочувствие нейрона нейтрально и равно нулю. При этом $E_N < E_H, E_N < E_E$.

Самочувствием нейронной сети будем называть взвешенную сумму значений функционала по всем нейронам:

$$Q_\Sigma = \sum_i \beta^i \cdot Q^i \quad (4.10)$$

Будем считать $\beta \in [0,1]$.

4.4. Модель порога генераторной зоны нейрона

Порог нейрона P будем считать суммой динамического порога $P_d(Q_\Sigma)$, определяемого суммарным самочувствием нейронов сети, порога по износу $P_H(H)$ и статического порога $P_0 = const$:

$$P = P_d(Q_\Sigma) + P_H(H) + P_0. \quad (4.11)$$

Для упрощения выбора параметров модели порога преобразуем эту запись следующим образом переопределив динамический порог и порог по износу как вклад в изменение статического порога:

$$P = (P_d(Q_\Sigma) + P_H(H) + 1) \cdot P_0. \quad (4.12)$$

И будем полагать $P_0 = 0.001$ – константное значение порога в модели нейрона (п. 3).

Динамический порог будем описывать следующей зависимостью:

$$P_d(Q_\Sigma) = P_{d \max} \cdot \frac{1}{1 + e^{-k_p^d \cdot (Q_\Sigma - Q_d)}}, \quad (4.13)$$

где Q_d определяет нормальный порог по самочувствию нейрона, и полагается таким, чтобы $P_d(0) = P_{d0}$.

Порог по износу $P_H(H)$, представим следующей составной функцией:

$$P_H(H) = \begin{cases} e^{\frac{k_{P0}^H}{H}} - e^{\frac{k_{P0}^H}{H_{cr}}}, & H < H_{cr} \\ -e^{k_{P1}^H(H - H_{cr})}, & H \geq H_{cr} \end{cases}, \quad (4.14)$$

где H_{cr} - критическое значение износа нейрона, при котором может начаться спонтанная генерация импульсов клеткой.

5. Интегральные характеристики нейронной сети

Выше мы рассмотрели параметры жизнеобеспечения отдельного нейрона, однако для оценки работы системы, нам необходимы характеристики всей нейронной сети. Будем рассматривать следующие характеристики.

Суммарный износ системы равен сумме износов всех нейронов.

$$H_{HC} = \sum_j H_j$$

Где H_{HC} - износ нейронной сети, H_j - износ нейрона j

При образовании новых нейронов, общий износ увеличивается, при гибели нейрона, износ нейронной сети уменьшается.

Суммарное самочувствие равно сумме самочувствий всех нейронов, оно характеризует качество работы системы.

$$Q_{HC} = \sum_j Q_j$$

Где Q_{HC} - самочувствие нейронной сети, Q_j - самочувствие нейрона j

Суммарный расход энергии равно сумме расходов энергии каждого нейрона

$$E_{HC} = \sum_j E_j$$

Где E_{HC} - расход энергии всей нейронной сети, E_j - расход энергии нейрона j

Суммарная частота генерации импульсов системы, является одним из самых важных параметров, т.к. эта величина косвенно определяет оптимум функционирования сети, сеть стремится минимизировать частоту разрядов, одновременно минимизируя суммарный износ. Таким образом, для стабильной работы и решения поставленной нами задачи, система должна найти определенную оптимальную частоту, для чего отдельные нейроны должны объединяться в группы (ансамбли), которые будут одинаково реагировать на последовательности образов, то есть, система будет распознавать последовательности однотипных образов, за счет чего уменьшится расход энергии.

6. Правила организации нейронных связей

6.1. Модель организации связей нейронов

Вес k -й связи G_k , $k = \overline{1, M}$ складывается из динамической части G_{Dk} как прообраза кратковременной памяти, и статической G_{Sk} , описывающей длительную

историю (долговременная память):

$$G_k = G_{Dk} + G_{Sk}.$$

Правилом обучения нейронов примем правило Хебба, записанное в форме, предложенное в [2], формулировка которого для нашей модели представлена ниже.

Введем вспомогательные функции $W_{xk}(x_k)$ и $W_{yk}(y)$ описывающие среднюю историю активности нейрона по заданному входу и выходу:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{xk} + \mu_x \cdot W_{xk} &= \gamma_x \cdot x_k \\ \dot{W}_{yk} + \mu_y \cdot W_{yk} &= \gamma_y \cdot y \end{aligned}$$

Тогда уравнения для статической и динамической компонент веса связи можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{G}_{Dk} + \mu_D \cdot G_{Dk} &= W_{xk} \cdot W_{yk} \\ \dot{G}_{Sk} + \mu_S \cdot G_{Sk} &= \gamma_{mot} \cdot W_{motk} \cdot G_{Dk} \end{aligned}$$

где W_{motk} - функция поощрения. Положим для простоты $W_{motk} = 1$.

$\mu_S \ll \mu_D, \mu_x, \mu_y$, т.к. является постоянной времени, усредняющей количество генераций по многим паттернам.

6.2. Выражение коэффициентов связей через параметры ожидаемых реакций нейронов сети

Для расчета диапазона значений μ_S , μ_D решим уравнения для статической и динамической компонент веса связи в зависимости от времени. Будем считать правую часть уравнений постоянной.

$$\dot{G}_{Dk}(t) + \mu_D \cdot G_{Dk}(t) = C$$

Уравнение для статической компоненты связи будет аналогичным, поэтому решение для обоих уравнений будет одинаковым.

Решением дифференциального уравнения будет:

$$G(t) = C \cdot (1 - \exp(-\mu \cdot t))$$

В условиях нашей задачи, в начальный момент времени ($t=0$), вес связи = 0, то есть

$$G(t) = 0, \text{ при } t=0$$

Учитывая эти начальные условия, получим, что константа $C = 1$. Таким образом полным решением будет:

$$G(t) = 1 - \exp(-\mu \cdot t)$$

В нашей модели вес синаптической связи нейрона задается его сопротивлением. Отношение сопротивления нейрона к сопротивлению мембраны должно находиться в диапазоне $[0.1; 10]$ [5]. Сопротивление мембраны в состоянии покоя ($R_0 = 1 \cdot 10^8$). Сопротивление синапса, таким образом может меняться в диапазоне $[1 \cdot 10^7, 1 \cdot 10^9]$.

Из чего следует, что $G(t)$ (являющийся множителем при заданном сопротивлении синапса, с номинальным значением $R_s = 1 \cdot 10^8$) должен меняться в интервале $[0.01; 1]$,

а результирующую проводимость синапса можно записать как:

$$g_{\kappa} = g_k \cdot (G_k + 0.01) \cdot 10.$$

Для расчета μ_D и μ_S для различных значений интервалов времени входа соответствующих функции $G_D(t)$ и $G_S(t)$ в коридор $[0.9; 1]$ получаем следующую таблицу значений (таблица. 1).

Таблица 1.

t, c	μ_S	t, c	μ_D
1	-2.3	0.01	-230
10	-0.23	0.1	-23
60	-0.038	1	-2.3
360	-0.0064	2	-1.15
1800	-0.00128	5	-0.46
3600	-0.00064	10	-0.23
86400	-0.000027	30	-0.078

Эти значения могут быть использованы для исследования взаимосвязи между

долговременной и кратковременной памятью, определяемой вкладами в веса связей $G_S(t)$ и $G_D(t)$ соответственно. Т.о. для моделирования необходимо выбирать μ_D и μ_S так, чтобы $\mu_S \ll \mu_D$.

7. Многослойные сети

В нашей модели используются многослойные сети.

Число нейронов в слое определяется числом генераторов (все нейроны 1го слоя получают подключенными к своему генератору), а общее число слоев = число нейронов сети/число генераторов. При этом связаны нейроны следующим образом: У каждого нейрона есть координата в двухмерном пространстве сети.

X – координата вдоль слоя,

Y - координата вдоль списка слоев.

При этом каждый нейрон связан только с теми, расстояния между которыми ≤ 1 . Если описать $v_1 = \{x_1, y_1\}$ $v_2 = \{x_2, y_2\}$ - векторы координат нейронов в пространстве сети, то расстояние будет считаться как эвклидово расстояние:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} .$$

Нейроны могут образовывать ансамбли.

Введем понятие бета-ансамблей. Любая последовательность связанных нейронов, со связями G_S больше порога является бета-ансамблем. Например:

N1 N2 N3

Ансамбль – группа нейронов, которая организовала внутри себя полную картину связей, то есть каждый нейрон имеет связь с каждым, внутри данной группы. Пример ансамбля:

N1 N2 N3

N2 N1 N3

N3 N1 N2

В каждой строчке выводится перечень нейронов: первым идет имя анализируемого нейрона, а за ним - все нейроны которые организовали на первом связи с Gs больше некоторого заданного порога. У ансамбля есть параметр «мощность», который определяет суммарное Gs всех нейронов этого ансамбля.

Предложенная модель нейрона описывает основные информационно-физиологические свойства естественного нейрона, такие как износ (старение) нейрона, получение энергии (питания) нейроном из внешней среды, изменение мембранного потенциала под воздействием внешней среды и внутреннего состояния.

Ниже рассмотрим примеры функционирования такой сети.

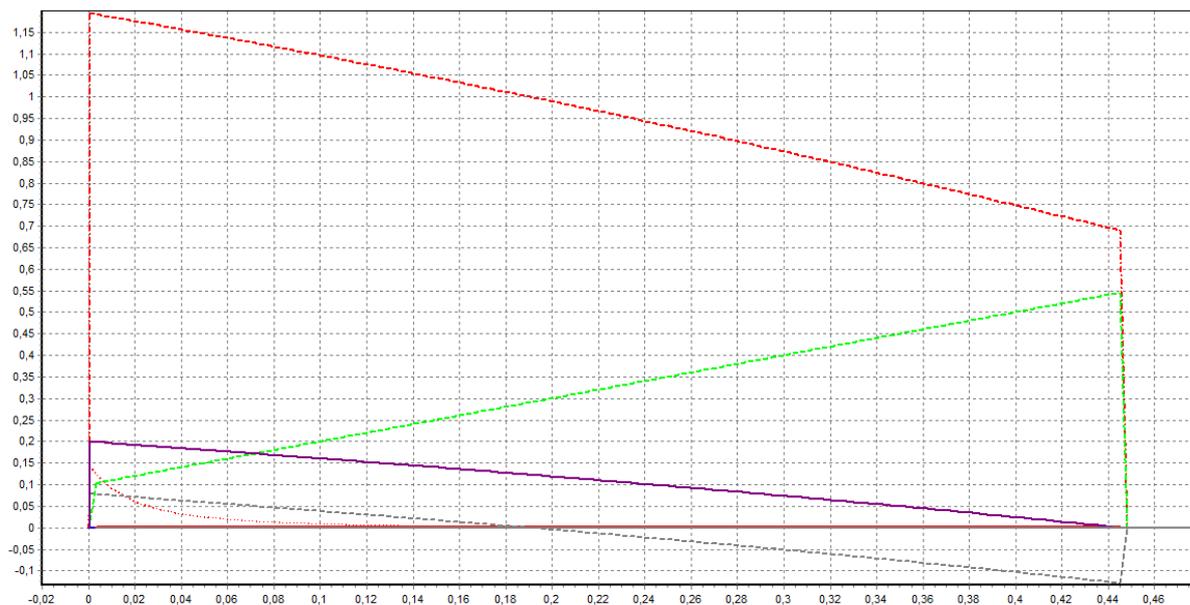
8. Исследования

8.1 Параметры одиночного нейрона

Рассмотрим отдельно реакции модели жизнеобеспечения нейрона. Положим в начальный момент времени:

- количество доступной энергии $E=0.2$;
- начальный износ нейрона $H=0.1$;
- подача энергии не осуществляется;
- генерация импульсов нейроном невозможна.

Реакции модели в этом простом случае представлены на рис. 8.1. Можно видеть, как по мере роста износа нейрона, снижается величина порога генераторной зоны, наблюдается почти линейная связь между запасом энергии и самочувствием (в виду малых величин производной энергии), и в итоге наступает смерть нейрона при достижении энергией 0 значения.



красный пунктир – суммарный порог нейрона
зеленый пунктир – износ
фиолетовый – запас энергии
серый пунктир – самочувствие

Рис. 8.1. Реакции модели жизнеобеспечения нейрона в условиях изоляции

Реакции модели на разряд нейрона можно наблюдать на рис. 8.2. Здесь отличие от предыдущего случая заключается в том, что в заданный момент времени искусственно формируется разряд нейрона. Можно видеть, что при возникновении импульса, происходит снижение величины износа H , вследствие расхода энергии на генерацию импульса, на время генерации существенно снижается самочувствие Q .

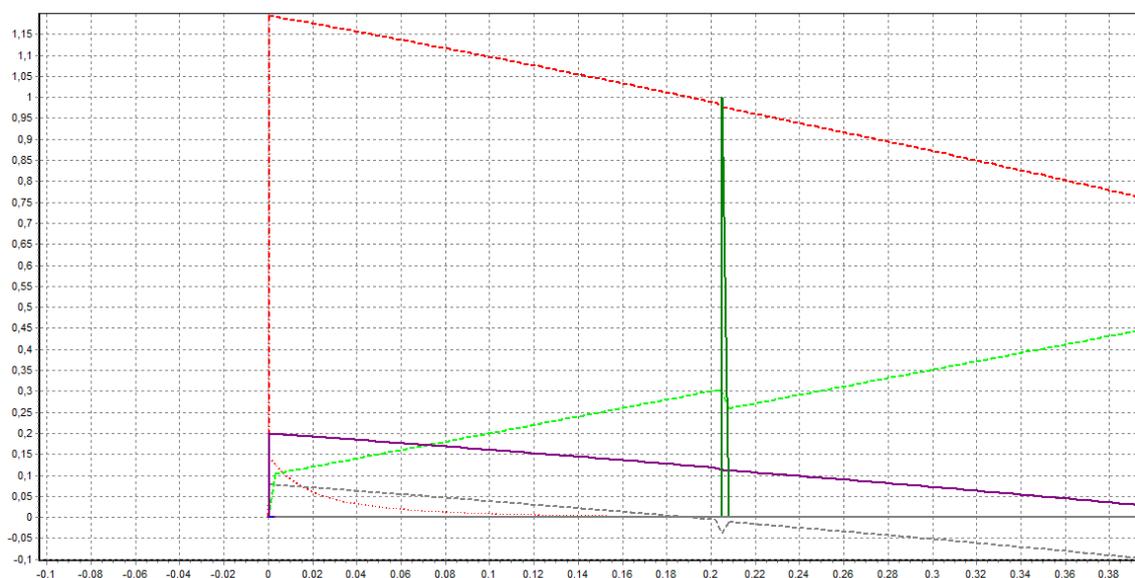


Рис. 8.2. Реакции модели жизнеобеспечения на разряд нейрона

На рис. 8.3 демонстрируется стабильное состояние полной модели нейрона в условиях отсутствия внешних воздействий и дефицита энергии. Изменены следующие условия:

- осуществляется подача энергии 1ед/с;
- нейрон способен генерировать импульсы.

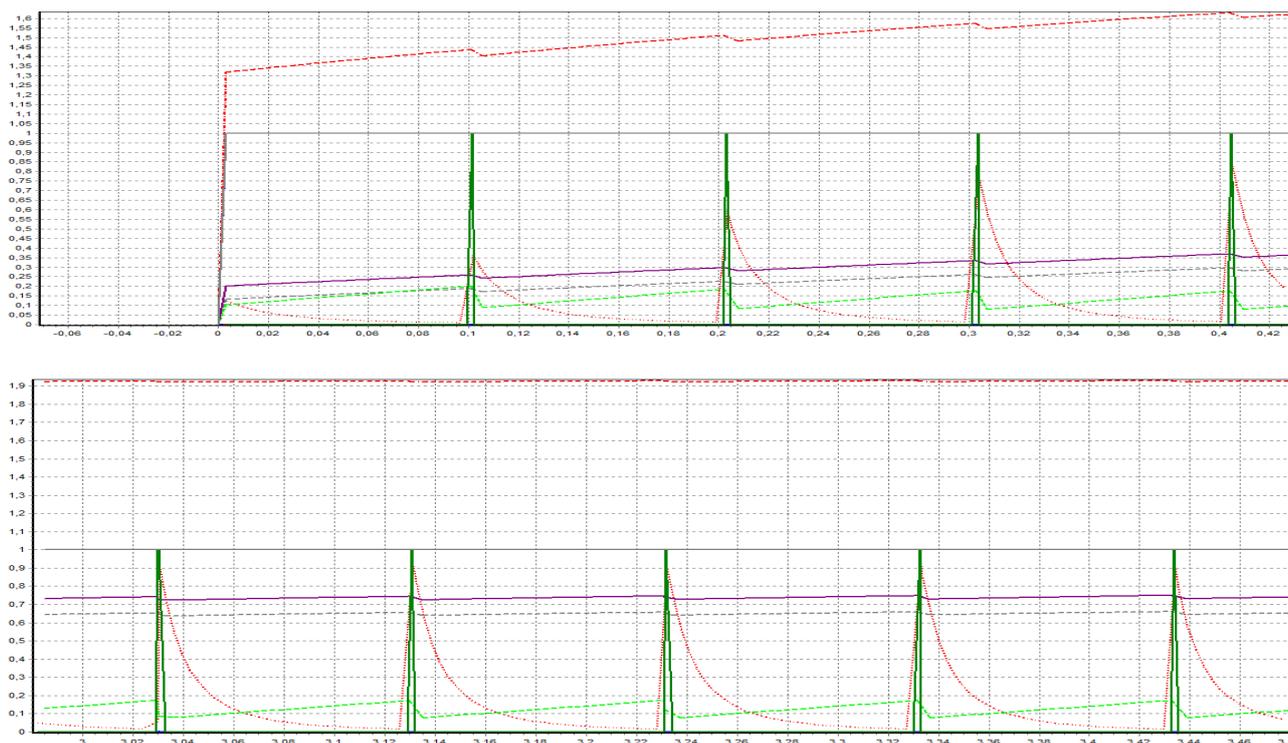


Рис. 8.3. Стабилизация состояния моделью нейрона

Как можно видеть, сразу после запуска модели, все параметры, находящиеся в начальных состояниях, стремятся прийти к определенным оптимальным значениям. Износ растёт, слегка уменьшаясь во время импульса. Запас энергии увеличивается, из-за того, что в начале работы модели износ достаточно мал, и следовательно мал расход энергии. После некоторого небольшого времени работы, система приходит в стабильное состояние, скачки параметров наблюдаются лишь во время импульсов.

Далее рассмотрим взаимодействие нейронов в составе сети.

8.2. Исследования сети

В случае, если в модели сети разрешено деление нейронов, то при запуске модели наблюдается следующая картина, хорошо демонстрируемая на графике

запаса энергии нейронов сети (рис. 8.4). На рисунке показано только 2 графика, т.к. все модели нейронов изначально имеют одинаковые параметры и состояния и графики их состояний совпадают. Т.о. будем рассматривать наблюдаемые состояния нейронов N5 и N10.

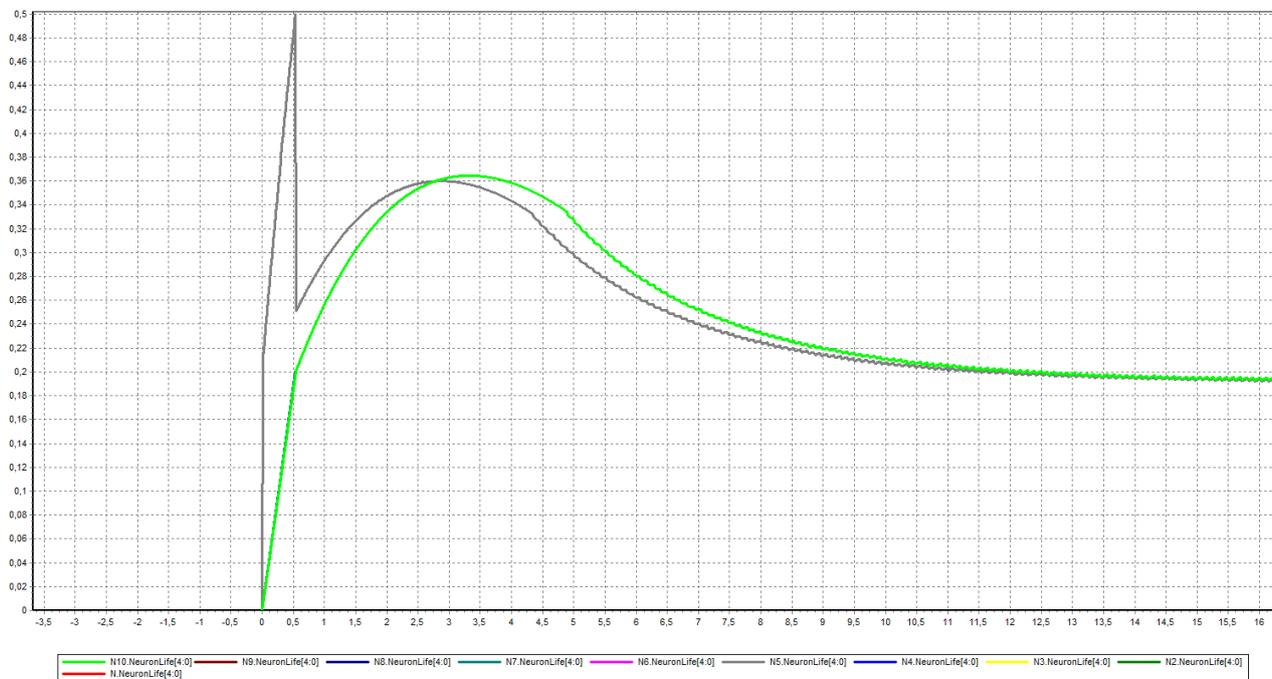


Рис. 8.4. Деление нейронов

На графике видно, что в начале функционирования модели запас энергии растет, так как при старте системы, износ достаточно мал, и соответственно потребление энергии тоже, кроме того, энергия не тратится на генерацию импульсов. При достижении определенного критического уровня энергии, принятого в тестах равном 0.5, происходит образование ещё одного нейрона, и видно что в этот момент запас энергии, выделяемый на другие нейроны, уменьшился (суммарное количество энергии сети постоянно). Энергия продолжает какое-то время расти, но новые нейроны не образуются, так как ее запас уже не достигает нужного уровня.

На рис. 8.5. представлен график изменения износа нейронов сети.

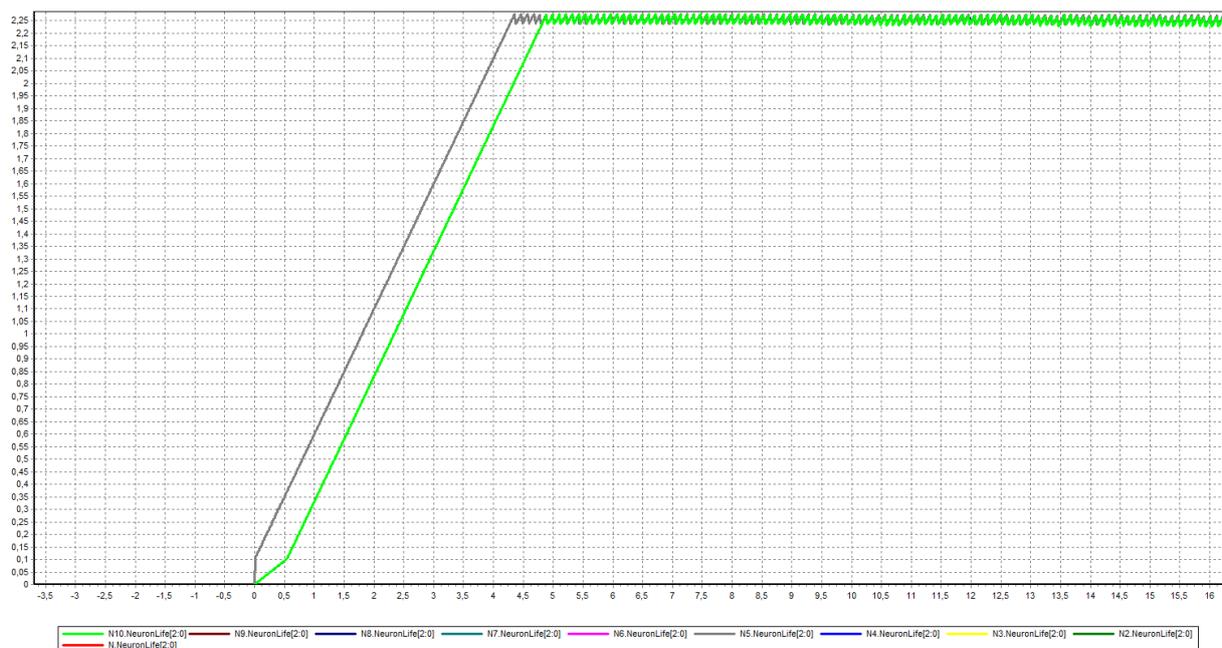


Рис. 8.5. График величины износа нейронов сети

В начальный момент времени износ близок к нулю, затем он начинает расти до некой критической величины, при достижении которой, нейроны начинают генерировать импульсы, тем самым стабилизируя величину износа. Таким образом состояние износа меняется в определенной интервале, увеличиваясь со временем до критического значения, и уменьшаясь на определенную величину при генерации нейроном импульса.

Графики интегральных характеристик сети можно видеть на рис. 8.6. Здесь демонстрируется стабилизация функционирования сети в отсутствии внешнего возбуждения.

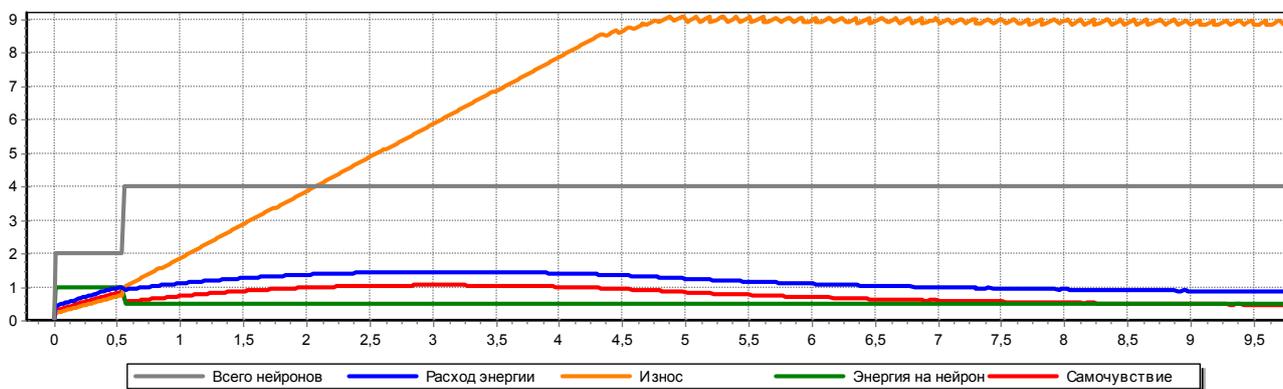


Рис. 8.6. Интегральные характеристики сети.

При запуске сети, вследствие того, что износ растет, увеличивается и потребление энергии. В момент, когда износ достигает критической величины, нейроны начинают генерировать импульсы, чтобы уменьшить износ, запас энергии начинает уменьшаться. Через некоторое время нейроны выходят на оптимальную частоту, при которой расход энергии, величина износа, самочувствие нейронов, и как следствие – частота генерации нейронами сети (рис. 8.7) становятся постоянными.

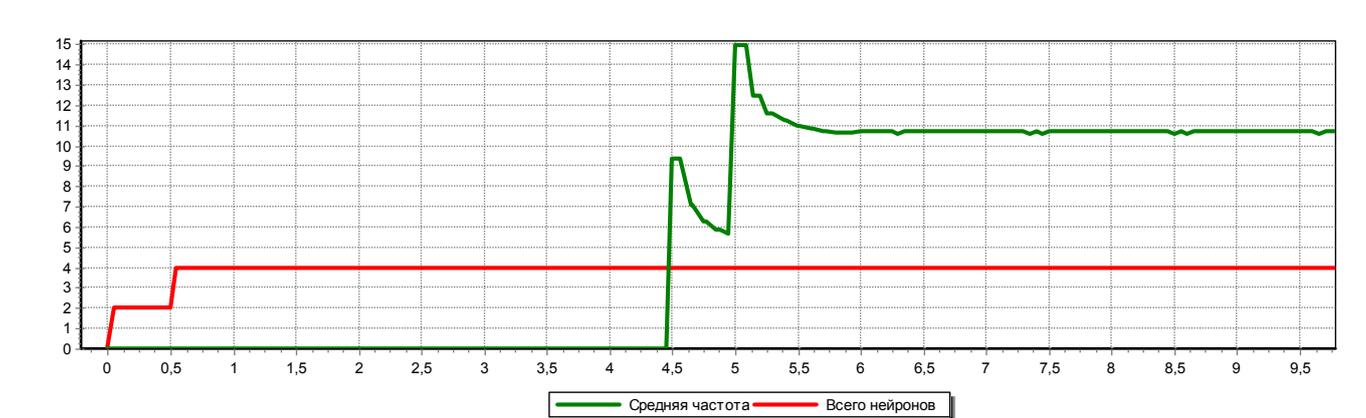


Рис. 8.7. Средняя частота сети

8.3. Организация связей в сети

На рис. 8.8 и 8.9 показано изменение динамической G_d и статической G_s компонент связей между нейронами. Рост весов связей всех нейронов сети здесь одинаков и обусловлен спонтанной генерацией нейронами импульсов.

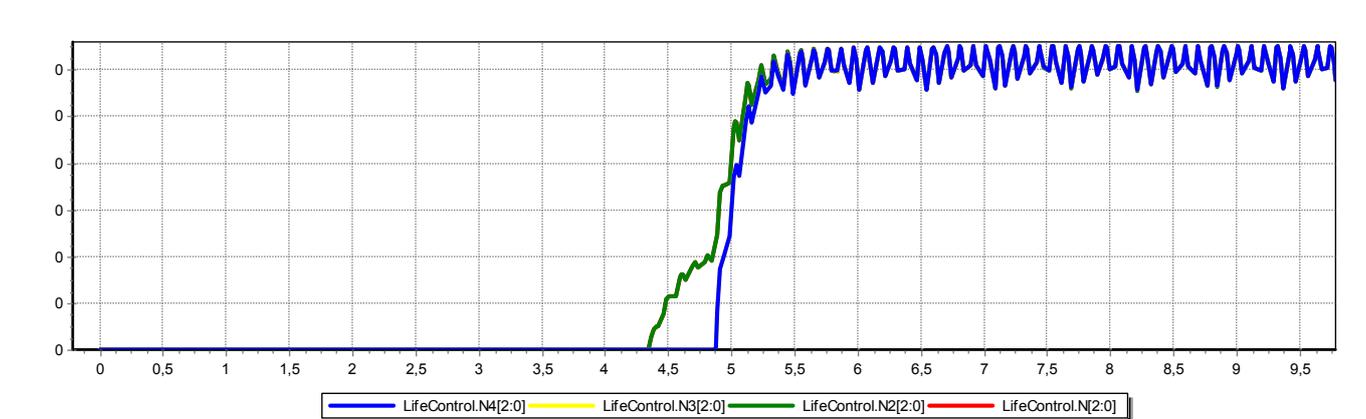


Рис. 8.8. Зависимость динамической составляющей веса от времени

До момента, когда нейроны начинают генерировать импульсы, динамическая составляющая веса равно нулю. Затем она быстро растет, достигая максимальной величины и начинает колебаться около определенного уровня, пропорционального частоте возбуждения нейрона.

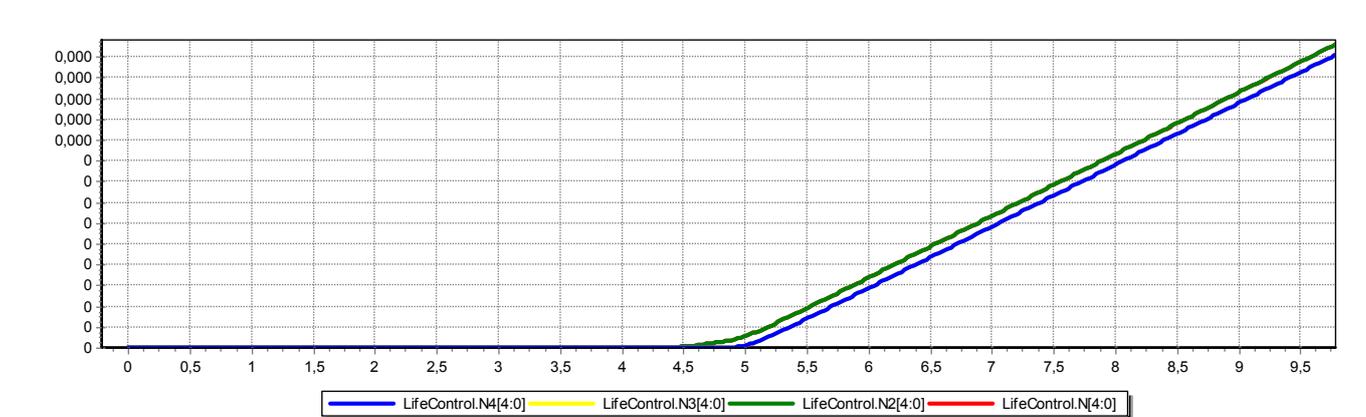


Рис. 8.9. Зависимость статической составляющей веса от времени

Длительная активность нейронов приводит к усилению статической компоненты связей.

8.4. Функционирование сети под действием внешнего возбуждения

Рассмотрим поведение модели под действием возбуждения по одному входу (Нейрон N4) частотой 10 Гц (рис. 8.10).

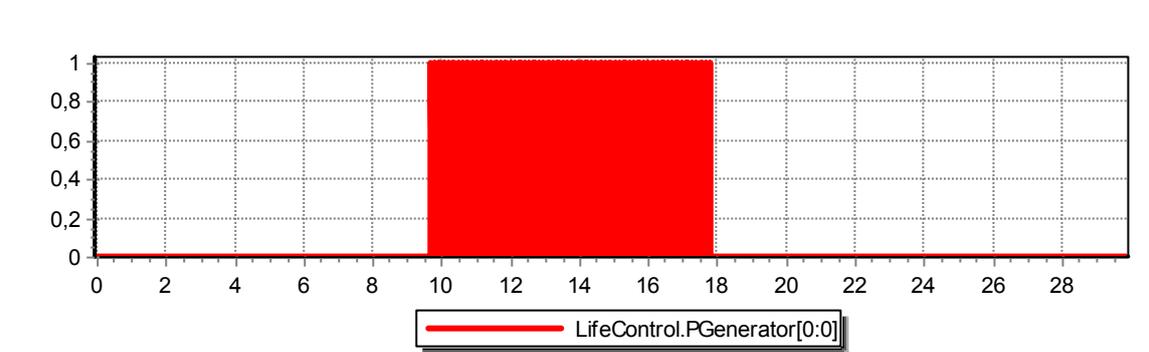


Рис. 8.10. Возбуждение на сенсорном нейроне

На рис. 8.11 виден рост запаса энергии нейрона N4 при наличии внешнего возбуждения, и восстановление прежнего запаса при потере входного сигнала.

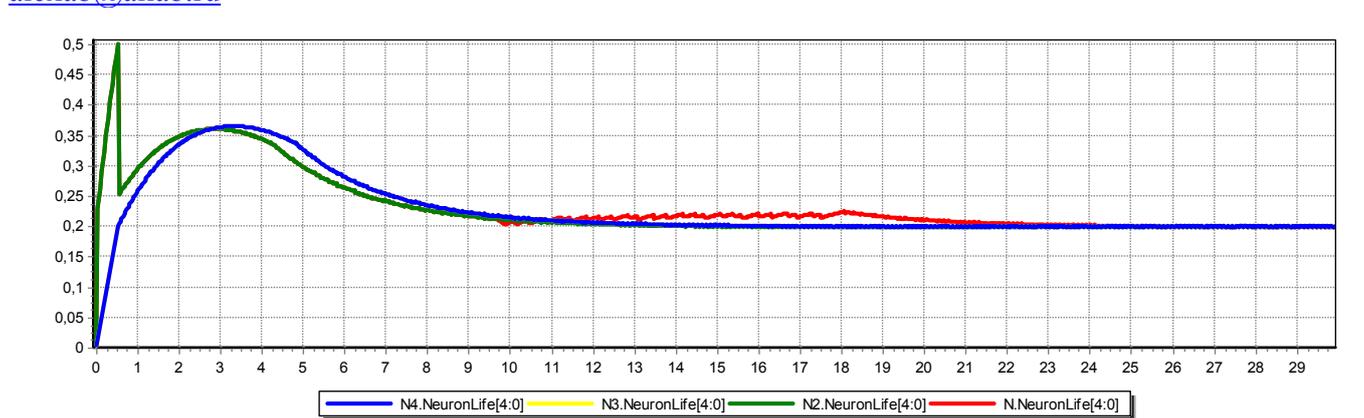


Рис. 8.11. Изменение запаса энергии нейрона при наличии внешнего возбуждения

На графике (рис. 8.12) видно, что на время возбуждения сенсорных нейронов, общий износ системы уменьшился, и как и ожидалось, уменьшилась частота генерации импульсов, что видно на рис. 8.13 (чем меньше износ, тем меньше надо «омолаживать» систему и частота генерации импульсов, за счет которых происходит снижение износа, будет меньше).

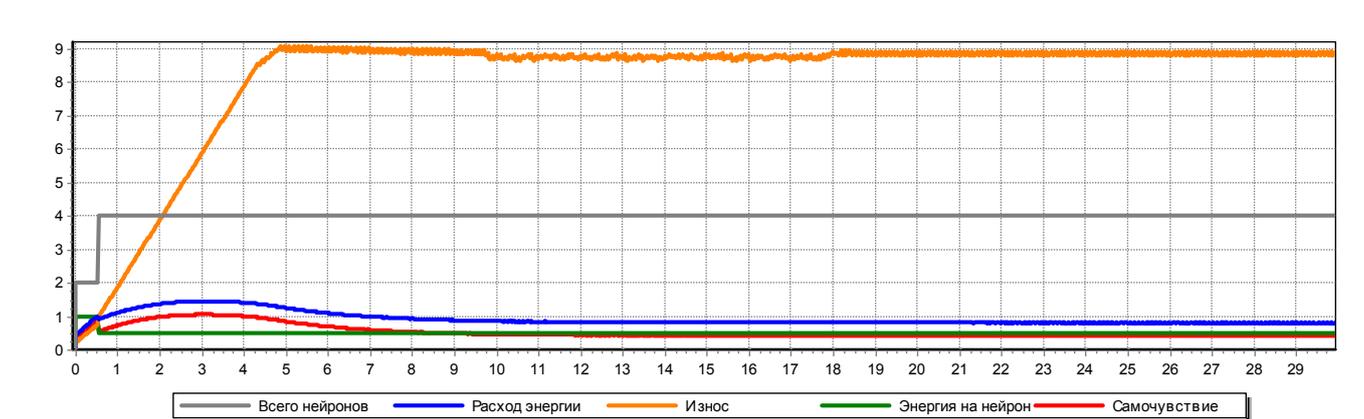


Рис. 8.12. Снижение износа сети за счет восприятия внешнего возбуждения

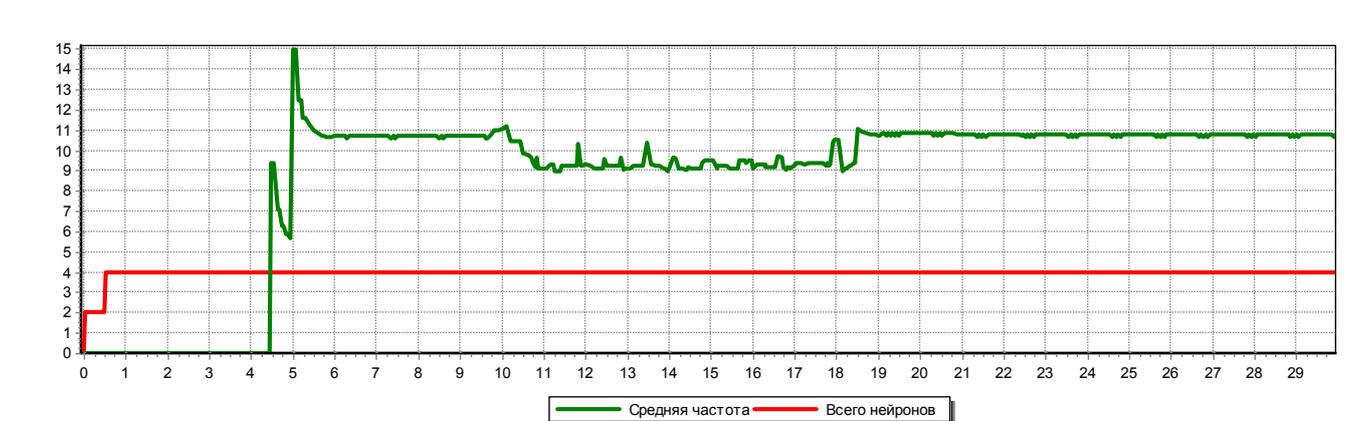


Рис. 8.13. Изменение средней частоты сети при наличии внешнего возбуждения

Резюмируя вклад, вносимый моделью системы жизнеобеспечения в модель импульсного нейрона, можно построить следующие графики основных характеристик модели для некоторого частного значения параметров.

Как было описано выше, при генерации нейроном импульса, происходит «омолаживание» нейрона, то есть его износ уменьшается, следовательно, чем выше частота генерации импульсов, тем меньше износ, что мы можем наблюдать на графике.

Частота генерации импульсов двояко сказывается на запасе энергии, с одной стороны она расходуется непосредственно на импульс, с другой стороны она уменьшает износ и, следовательно, расход энергии на генерацию импульсов. Как мы видим на графике существует оптимальная частота, при которой запас энергии будет максимальным. С появлением генерации импульсов запас энергии растет, но при превышении определенной частоты, расход энергии на генерацию импульсов становится слишком большим и нейрон погибает.

Самочувствие напрямую зависит от запаса энергии нейрона, поэтому характер кривой, как и ожидалось, повторяет зависимость запаса энергии от частоты.

Во время стимуляции сети внешними импульсами, усиливается связь между нейронами, что хорошо видно на графике (рис. 8.14), причем динамическая составляющая, отвечающая за кратковременную память, с появлением импульса быстро выходит на определенный уровень, и когда генерация импульса завершается, возвращается приблизительно до прежнего уровня.

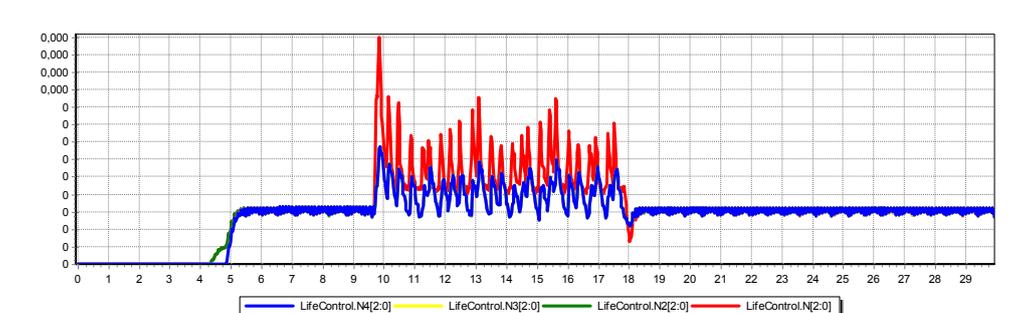


Рис. 8.14. Изменение динамической компоненты связи под действием внешнего возбуждения

Статическая же составляющая (рис. 8.15), после включения генератора, стала медленно расти, и не сразу упала до старого значения после отключения генератора, а стала медленно к нему стремиться, что мы можем наблюдать на графике.

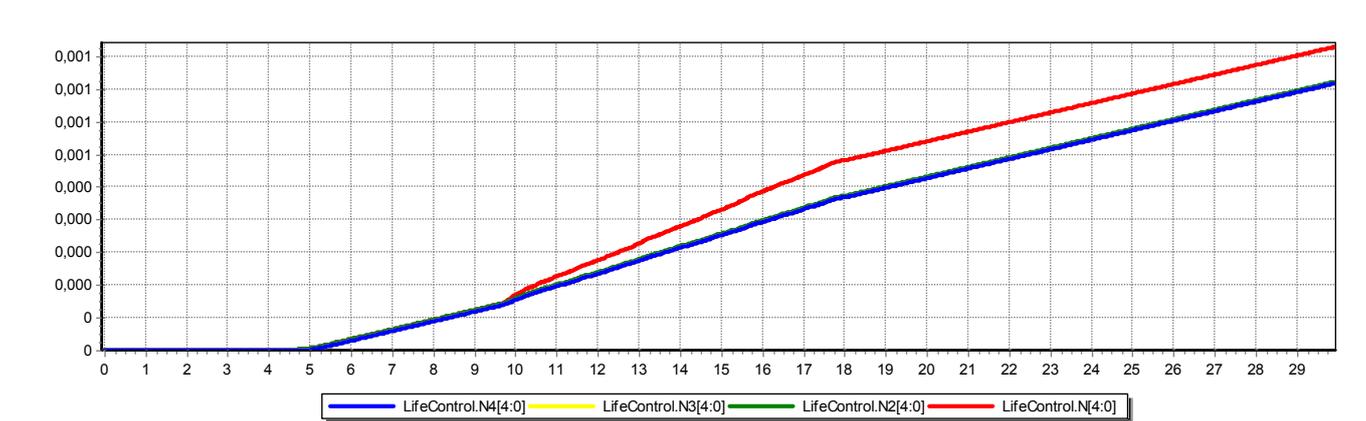


Рис. 8.15. Изменение статической компоненты связи под действием внешнего возбуждения

Результирующее значение веса представлено на рис. 8.16.

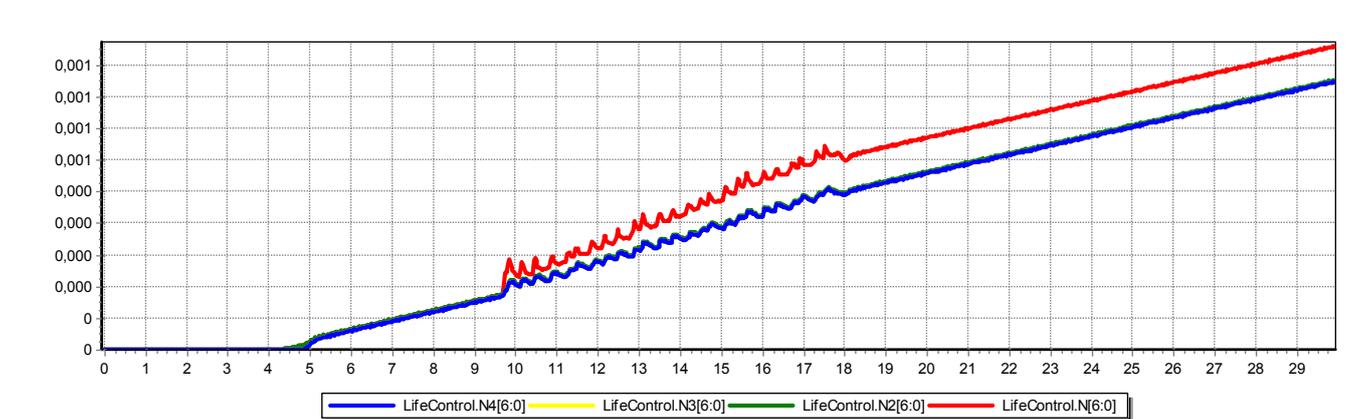


Рис. 8.16. Суммарное изменение веса связи под действием внешнего возбуждения

8.5. Исследование ансамблей

Рассмотрим нейронную сеть состоящую из 4 нейронов, где 2 нейрона (N, N2) являются сенсорными. Для формирования ансамбля активируем оба входа (рис. 8.17, время ~10с).

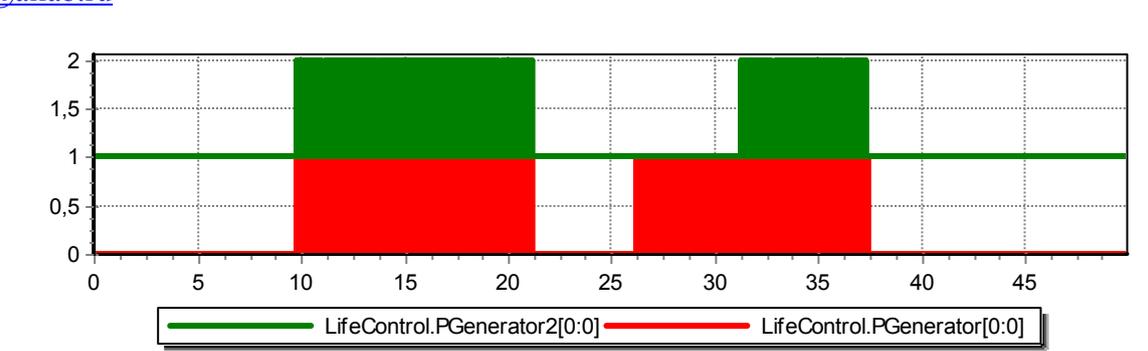


Рис. 8.17. Источники сигнала

В течении 1с формируется ансамбль из пары нейронов N+N2. На рис. 8.18 представлены реакции ансамблей. На графике показана активность (средняя частота разрядов нейронов) ансамбля. Можно видеть, что при наличии возбуждения, формировавшего ансамбль – активность ансамбля держится на уровне ~5Гц, тогда как при отсутствии возбуждения активность ансамбля стабилизируется на частоте ~10.5Гц. Возможны промежуточные состояния (интервал времени 26-31с) когда активируется только часть нейронов ансамбля.

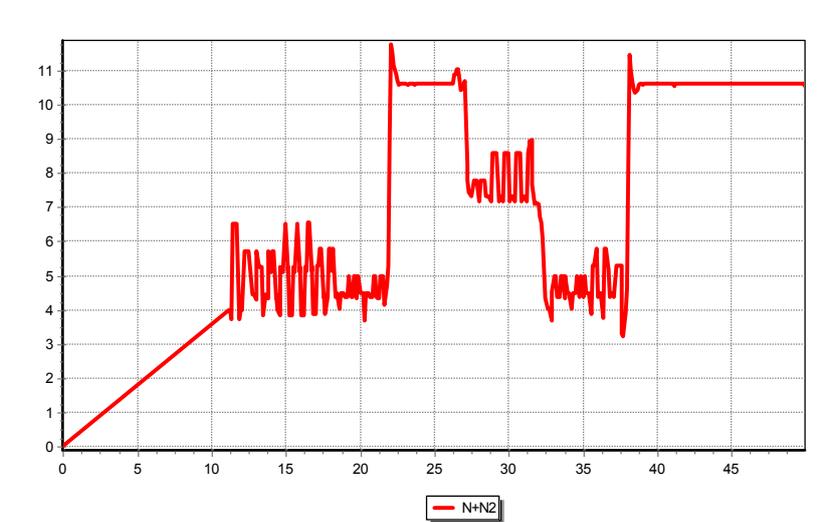


Рис. 8.18. Формирование и реакции ансамбля

Соответствующая средняя частота разрядов сети представлена на рис. 8.19.

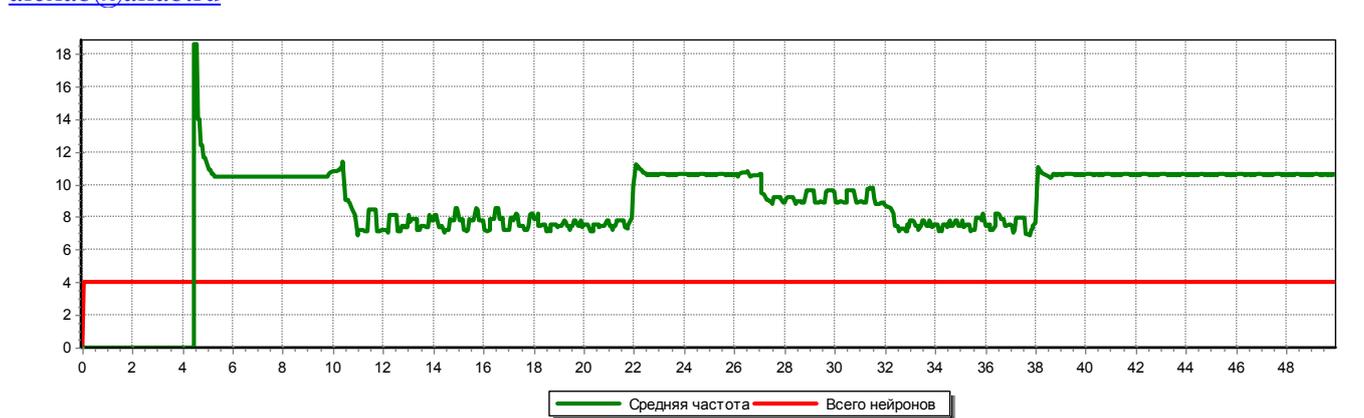


Рис. 8.19. Активность сети

Далее рассмотрим сеть из 2 слоев в каждом по 3 нейрона, первый слой является сенсорным. Таблица ансамблей представлена на рис. 8.20. Формирование ансамблей можно видеть на рис. 8.21-8.22. Частота входных воздействий 10Гц.

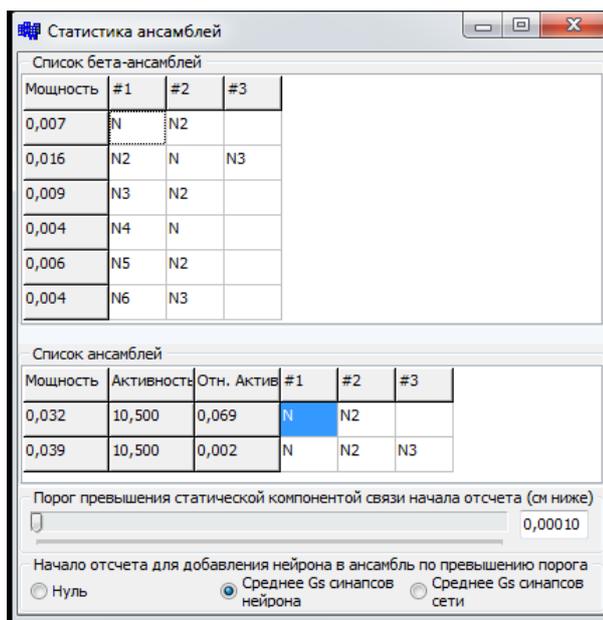
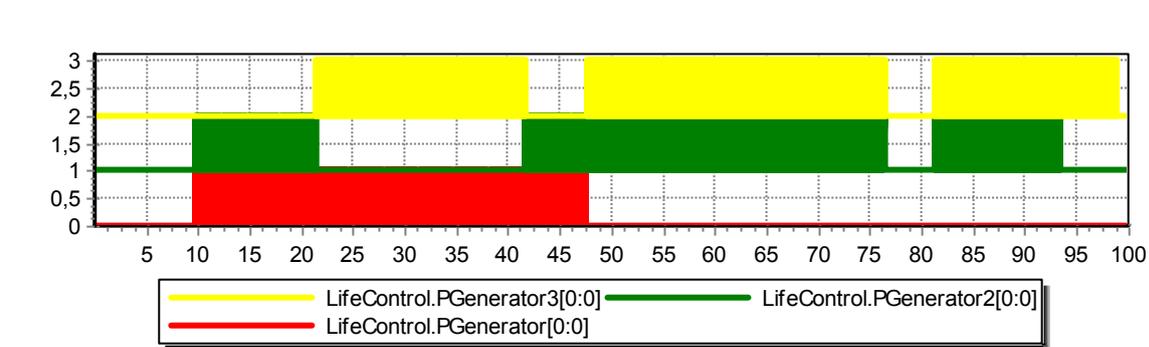
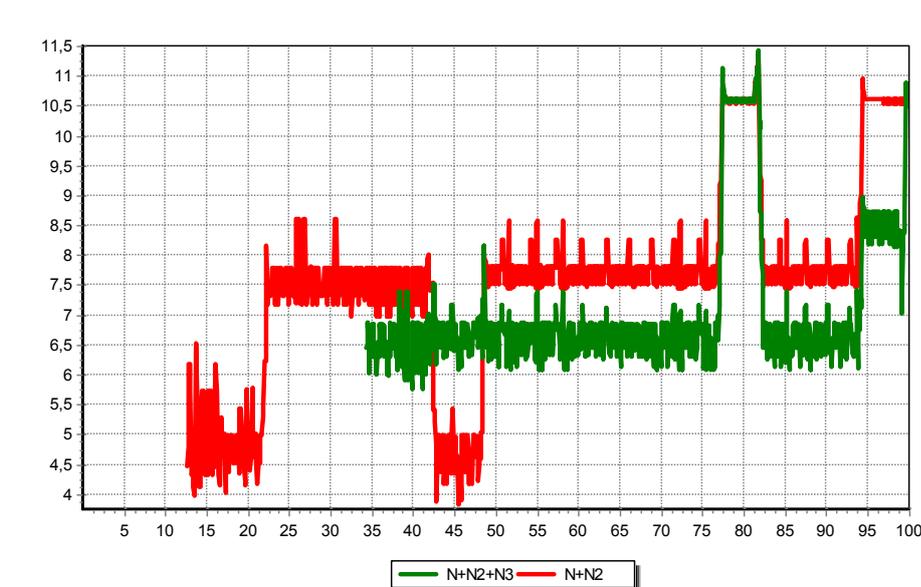


Рис. 8.20. Список ансамблей сети



8.21. Источники сигнала



8.22. Активность ансамблей

Заключение

1. Был проведен анализ структуры и функций биологического нейрона, изучены модели искусственных нейронных сетей, и подробно рассмотрена модель нейрона, как квазиживого объекта функционирующего в условиях ограниченных ресурсов и времени существования. Основопологающей идеей работы, является высказанное и разработанное в [2] утверждение о том, что структура нейронной сети, и ее информационные свойства определяются функционированием ее функциональных элементов – нейронов. Т.е. целое образуется и функционирует ради своих элементов. Реакции модели определяются, помимо внешних воздействий, такими внутренними параметрами нейрона, как износ и запас энергии накапливаемой нейроном в процессе функционирования. Вторым утверждением является то, что разряд в нейроне нужен самому нейрону.

2. В работе была предложена схема разделения модели нейрона на два самостоятельных модуля: модель нейрона как преобразователя импульсного потока, и нейрона как квазиживого объекта.

3. Разработана математическая модель такого нейрона.

4. Проведено исследование работы модели нейрона и анализ принципов организации нейронов в группы (ансамбли) под воздействием внешнего возбуждения различного характера.

5. В качестве направлений дальнейших исследований предполагается решение следующих задач:

- Добавление в модель нейрона управления тормозными связями.
- Детальное исследование взаимодействия ансамблей их свойств и поиск способов их практического использования для решения частных задач, таких как, например построение модели окружающей среды.
- Разработка методики переноса формально определяемых задач, в пространство потребностей нейронной сети.
- Построение модели анимата, с управлением на базе предложенной нейронной сети, решающий задачи выживания в среде.
- Развитие абстрактного понятия самочувствие до самостоятельной системы, равноправно взаимодействующей с искусственной нервной системой, сенсорами и эффекторами анимата.

Список использованных источников

1. Юревич Е.И., Бахшиев А.В. О новом подходе к созданию технического зрения // Мехатроника, автоматизация, управление/ М.: Новые технологии, 2004. – с.268-271.
2. Емельянов-Ярославский Л.Б. Интеллектуальная квазибиологическая система (Индуктивный автомат) / М.: Наука, 1990. 112 с.
3. Романов С.П., Бахшиев А.В Математическая модель биологического нейрона / Труды семинара «Моделирование неравновесных систем – 2000» (20-22 октября 2000 г. Красноярск)
4. А.В. Бахшиев, С.П. Романов. – Математическое моделирование процессов преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, №3, 2009. – с.71-80.

5. А.В. Бахшиев. – Воспроизведение реакций естественных нейронов как результат моделирования структурно-функциональных свойств клеточной мембраны // Робототехника. Взгляд в будущее. Труды международного научно-технического семинара. Санкт-Петербург: Изд-во "Политехника-сервис", 2010, с.240-244.

6. И.В. Кудинов, А.В. Бахшиев. – Моделирование принципов выживания нейронов в условиях ограниченных ресурсов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. XV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –С.26-28.