

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАССИЧЕСКОГО УСЛОВНОГО РЕФЛЕКСА С ДВУСТОРОННЕЙ СВЯЗЬЮ

Д. С. МЕЛКОНЯН, К. С. БАБАЯН

Предлагается математическая модель классического условного рефлекса, согласно схеме Э. А. Асратяна, допускающая имитацию явлений двусторонней связи. Приводятся результаты машинных экспериментов, в которых исследованы основные характеристики процессов обучения. Показана зависимость кривых обучения от порядка предъявления стимулов и временных соотношений между ними.

В последнее время значительно возрос интерес к математическому моделированию процессов условнорефлекторной деятельности, поскольку стало очевидным, что модели условных рефлексов, основанные на теории формальных нейронов [1], требуют существенного развития и пересмотра в соответствии с фактическими данными нейрофизиологии.

В частности, в области структурно-функционального моделирования процессов условнорефлекторной деятельности в последнее время разработан ряд новых нейронных моделей условных рефлексов [2], в которых теоретические предпосылки сближены с современными данными физиологии высшей нервной деятельности.

Нами сделана попытка учета при построении модели классических условных рефлексов явлений двусторонней связи в соответствии со схемой условного рефлекса, предложенной Асратяном [3].

Особенности условного рефлекса с двусторонней связью. При математическом моделировании классического условного рефлекса по И. П. Павлову наиболее общим требованием для образования условной связи является необходимость сочетания во времени двух раздражителей различных модальностей, один из которых считается безусловным, а другой — индифферентным. Последний в процессе выработки условного рефлекса приобретает роль условного раздражителя.

С точки зрения моделирования, принципиальное значение классического условного рефлекса с двусторонней связью согласно схеме Асратяна [3], представленной в несколько формализованном виде на рис. 1А, заключается в том, что в такой трактовке отсутствует деление стимулов на условные и безусловные. Динамика протекания процессов проторения временных связей в прямом и обратном направлениях определяется порядком сочетания и параметрами стимулов. Модель классического условного рефлекса с двусторонней связью не может быть получена прос-

тым сопряжением двух моделей условного рефлекса с односторонней связью. Действительно, феномен двусторонних связей означает, что условия, необходимые для протерения временной связи в прямом направлении, определенным образом воздействуют и на связь в обратном направлении. Благодаря этому выявляется комплекс наиболее интимных механизмов формирования условного рефлекса, которые выпадают из поля зрения при анализе условного рефлекса с односторонней связью.

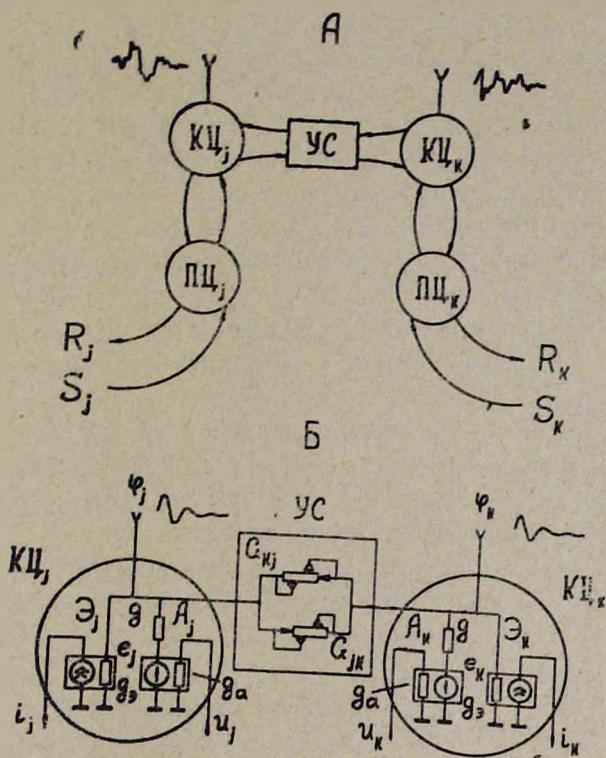


Рис 1. А. Схема дуги условного рефлекса с двусторонней связью. Б. Эквивалентная электрическая схема корковой части.

Развивая идею о двусторонней условной связи до ранга общего принципа, Э. А. Асратян выдвигает положение о необходимости рассмотрения «...новой разновидности ассоциации, отличающейся тем от обычных условных рефлексов, что здесь связываются временной связью явления, которые связаны между собой и в действительности, явления, между которыми существует внутренняя, как бы логическая связь и в реальной жизни» [4].

Основные свойства модели. Выделим основные свойства реальной системы, которые имитируются на основе предлагаемой модели.

1. Чувствительность к порядку предъявления стимулов. В зависимости от порядка подачи первый приобретает роль условного стимула, а второй—подкрепления. При их одновременной подаче протерения временных связей не происходит.

2. Чувствительность к временным параметрам стимулов. В зависимости от временных соотношений между стимулами меняются характеристики процессов в прямом и обратном направлениях.

Необходимость учета этих факторов привела к построению модели в виде нелинейной, нестационарной, динамической системы, процессы изменения параметров которой происходят на основе анализа переходных процессов, имитирующих вызванные потенциалы в корковых центрах дуг безусловных рефлексов.

Модель. Блок-схема модели приведена на рис. 1А. Системами КЦ и ПЦ представлены корковые и соответственно подкорковые центры дуг безусловных рефлексов, а системой УС (условная связь) — комплекс механизмов нейронной деятельности, осуществляющих связь между корковыми центрами. Поскольку анализируются процессы образования и угашения условной связи, основное внимание сосредотачивается на той части блок-схемы, которой имитируются процессы в корковых центрах. На рис. 1Б приведена электрическая схема модели. Функциями времени $u(t)$ и $u_k(t)$ описываются сигналы, поступающие от афферентных входов дуг безусловных рефлексов, а функциями $i_j(t)$ и $i_k(t)$ — сигналы, посылаемые из корковых центров к эффекторным отделам дуг безусловных рефлексов.

Поступление внешнего стимула на вход дуги безусловного рефлекса в момент времени t_j имитируется в последнем возникновением эфферентного сигнала $u_j(t) = U_j \delta(t - t_j)$, где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака, а U_j — величина, характеризующая силу стимула.

Афферентный стимул $u_j(t)$ возбуждает в корковом центре источник э. д. с. A_j , переходный процесс в котором описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 e_j(t)}{dt^2} + 2\alpha_j \frac{de_j(t)}{dt} + (\alpha_j^2 + \beta_j^2) e_j(t) = \beta_j u_j(t). \quad (1)$$

При нулевых начальных условиях, соответствующих установившемуся состоянию источника A_j , уравнение (1) имеет решение

$$e_j(t) = U_j \exp[-\alpha_j(t - t_j)] \sin[\beta_j(t - t_j)] l(t - t_j), \quad (2)$$

где $l(t)$ — единичная ступенчатая функция.

В качестве переменной, характеризующей состояние коркового центра j , служит функция $\varphi_j(t)$, описывающая потенциал точки, служащей входом в систему условной связи. Связь между функциями $\varphi(t)$ и $e(t)$ определяется уравнениями:

$$\varphi_j(t) = \frac{g[g + g_s + G_-(t)]}{(g + g_s)[g + g_s + 2G_-(t)]} e_j(t) + \frac{gG_-(t)}{(g + g_s)[g + g_s + 2G_-(t)]} e_k(t), \quad (3)$$

$$G_-(t) = \begin{cases} G_{jk}(t) & \text{при } e_j(t) > e_k(t) \\ G_{kj}(t) & \text{при } e_k(t) \geq e_j(t). \end{cases} \quad (4)$$

Аналогичные уравнения для коркового центра k получаются путем замены индексов j на k и наоборот.

Эфферентный функциональный генератор \mathcal{E}_j представляет пороговый элемент, чувствительный к амплитуде $\varphi_j(t)$. При срабатывании элемента вырабатывается эфферентный сигнал $l_j(t)$.

Система условной связи включает два встречно соединенных элемента с односторонней проводимостью, символически обозначенных в виде резистора со стрелкой, показывающей направление пропускания тока, и двумя управляющими электродами, подключенными к полюсам элемента. Эффекты образования и угашения временной связи в прямом и обратном направлениях имитируются путем изменения проводимостей $G_{jk}(t)$ и $G_{kj}(t)$ элементов, образующих условную связь. При этом динамика изменения проводимостей условной связи описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dG_{jk}(t)}{dt} = \frac{K_{об}}{G_{jk}(t)} [u_{kj}(t) - U_{п. об}]^+ - K_{т} [G_{jk}(t) - G_m] [u_{jk}(t) - U_{п. т}]^+, \quad (5)$$

где

$$[f(t)]^+ = \begin{cases} f(t) & \text{при } f > 0 \\ 0 & \text{при } f \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{jk}(t) = \varphi_j(t) - \tau_k(t). \quad (7)$$

$U_{п. об}$ и $U_{п. т}$ — пороги чувствительности по обучению и торможению, а $K_{об}$ и $K_{т}$ — коэффициенты чувствительности.

Уравнения для проводимости G_{kj} получаются из (5), как и выше путем взаимной замены индексов j и k . Как следует из (5), изменения проводимостей условной связи при установившемся состоянии корковых центров не происходит. Эффекты облегчения и угашения временных связей являются следствием протекания переходных процессов в корковых центрах дуг безусловных рефлексов.

Алгоритм вычислений. На основании разработанной модели построен алгоритм расчета динамических кривых выработки и угашения двусторонней условной связи при различных условиях сочетания условных и безусловных стимулов. Кривые обучения и угашения рассматриваются как зависимости проводимостей условной связи в функции от номера сочетания $G_{jk}[n] = G_{jk}(t_n)$ и $G_{kj}[n] = G_{kj}(t_n)$, где t_n — момент подачи первого по порядку стимула n -го сочетания.

Функции $G_{jk}(t)$ и $G_{kj}(t)$ рассчитываются путем численного интегрирования дифференциальных уравнений (5) при начальных условиях $G_{jk}[0]$ и $G_{kj}[0]$, соответствующих состоянию условной связи до эксперимента. Алгоритм вычислений построен на основе метода Рунге-Кутты, 4-го порядка с постоянным шагом. Выбранный при расчете шаг обеспечивает точность вычислений порядка 0,1%. При моделировании на ЭЦВМ функция разности потенциалов корковых центров $u_{jk}(t)$ в правой части дифференциального уравнения (5) рассчитывается на основании выра-



жений (2) — (4), (6) и (7). Исходными данными при расчете кривых обучения и угашения служат: параметры модели, начальные значения проводимостей условной связи, значения сил сочетаемых раздражителей и интервалов между сочетаемыми стимулами.

Данные машинных экспериментов. Целью машинных экспериментов было исследование свойств модели: процессов выработки и угашения временной связи при сочетании внешних стимулов и изолированном предъявлении одного из раздражителей, зависимости характеристик обучения модели от величины межстимульного интервала, двусторонние условные связи.

Все исходные данные машинных экспериментов приведены в таблице в относительных единицах с указанием рисунка (таблица). Моделирование проводилось на ЭЦВМ «Наири-2».

На рис. 2А представлены динамические кривые выработки условного рефлекса с последующим угашением. В течение 43 опытов внешние сти-

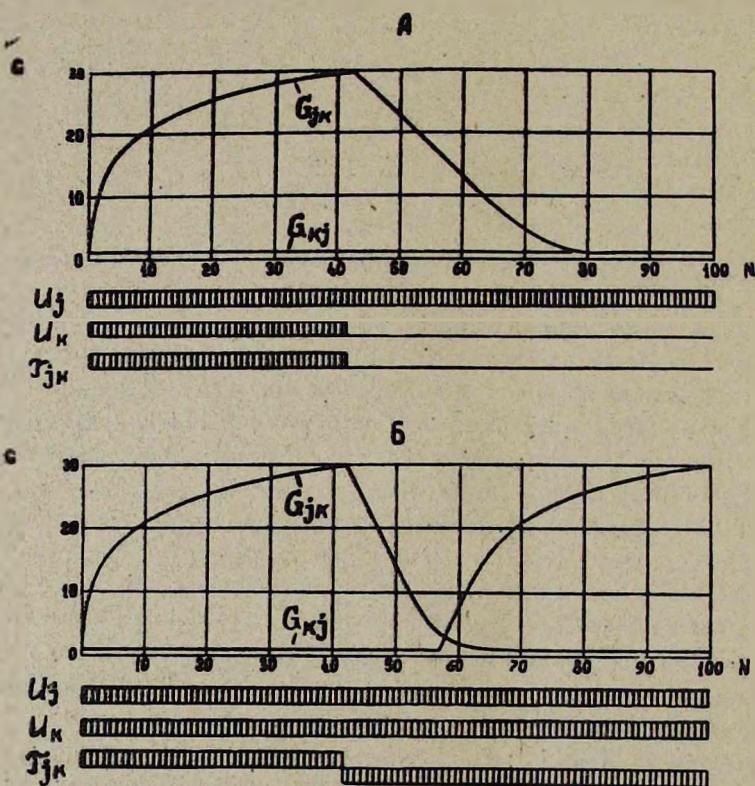


Рис. 2. А. Кривые выработки и угашения временной связи. Б. Кривые изменения проводимости двусторонней условной связи при изменении порядка предъявления внешних стимулов.

мулы различных модальностей сочетались при одном и том же временном сдвиге. При этом, как следствие проявления феномена обуславливания, стимул, подаваемый первым, а именно u_j , приобретал роль условно-

го, второй же — безусловного. Сначала прямая связь облегчалась быстро, затем процесс замедлялся, стремясь к насыщению. К концу цикла обучения проводимость прямой связи оказалась увеличенной в 30 раз. Обратная связь не облегчалась. После этого была проведена серия опытов, в которых подаваемый изолированно стимул приобретал роль условного, без подкрепления. Как видно из полученных данных, к 80-му опыту выработанный условный рефлекс полностью угасает.

Динамическая кривая, представленная на рис. 2Б, иллюстрирует эксперимент, в котором после цикла обучения, как и в предыдущем случае состоящего из 43 сочетаний, меняется порядок предъявления стимулов (на диаграмме межстимульный интервал τ_{jk} меняет знак). В полном соответствии с феноменом двусторонней условной связи, изменение порядка подачи стимулов приводит к угашению бывшей прямой связи и облегчению обратной. В течение ряда сочетаний наблюдается перестройка условной связи в соответствии с новым физиологическим значением внешних стимулов.

Таблица

Рис.	g	g _в	G _m	α ₁	α _к	β ₁	β _к	K _{об}	K _т	U _{п. об}	U _{п. т}	U ₁	U _к	τ _{jk}	
2	А	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3; 0	1; 0
	Б	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3; 3	1; —1
3	А	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3	1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5
	Б	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3	1; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5
4	1	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3	0—3,5
	0,9														
	1,0														
	1,1														
5	А	5	10	1	0,5	0,5	π	π	500	0,5	0,8	0,05	3	3; 3; 3	1; —1; 0; 1,732; 1,733
	Б							2π							
	В							π							
	Г							2π							

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на динамику развития временной связи, является межстимульный интервал. На рис. 3А и Б приведено семейство динамических кривых обучения, полученных в машинных экспериментах по выработке условного рефлекса при различных временных интервалах между сочетаемыми стимулами. Скорость обучения и уровень, на котором насыщаются кривые обучения, как видно из графиков, зависят от величины межстимульного интервала. Поскольку уровень насыщения кривой обучения можно трактовать как прочность временной связи, то для наглядного представления взаимосвязи этих двух параметров на рис. 4 (кривая 1) приведена зависимость установившегося значения проводимости условной связи $G_{уст}$ в функции

от межстимульного интервала τ . Для сравнения на том же графике приведены зависимости, полученные при других величинах порога обучения.

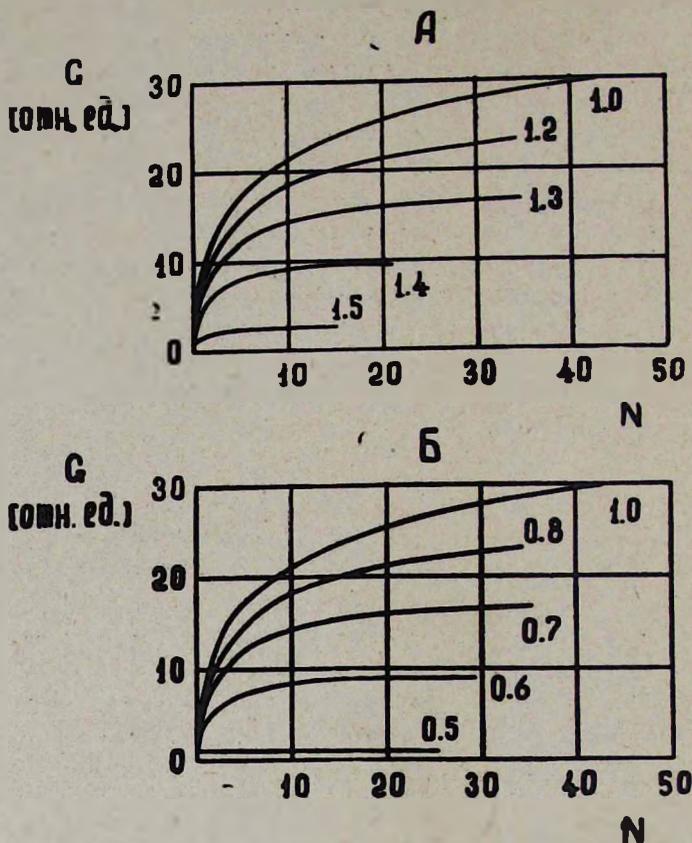


Рис. 3. А и Б. Семейство кривых облегчения прямой проводимости условной связи, полученных при различных величинах межстимульного интервала.

Как видно из рис. 4, кривая I имеет два максимума, соответствующие двум оптимальным значениям межстимульного интервала ($\tau_{оп.1} = 1,0$ и $\tau_{оп.2} = 3,0$), и минимальное значение межстимульного интервала ($\tau_m = 0,5$), начиная с которого система обучается, что находится в соответствии с экспериментальными данными [5].

На рис. 5 приведены результаты машинных экспериментов, в которых проявляются те или иные свойства условнорефлекторной деятельности. Рис. 5А иллюстрирует процесс выработки условного рефлекса при попеременном подкреплении, когда порядок предъявления сочетаемых стимулов меняется через опыт, а абсолютная величина межстимульного интервала остается неизменной. Интересно отметить, что поведение модели в значительной степени предопределяется порядком подачи стимулов при первом же сочетании, где соответствующие стимулы приобретают роль условного и безусловного.

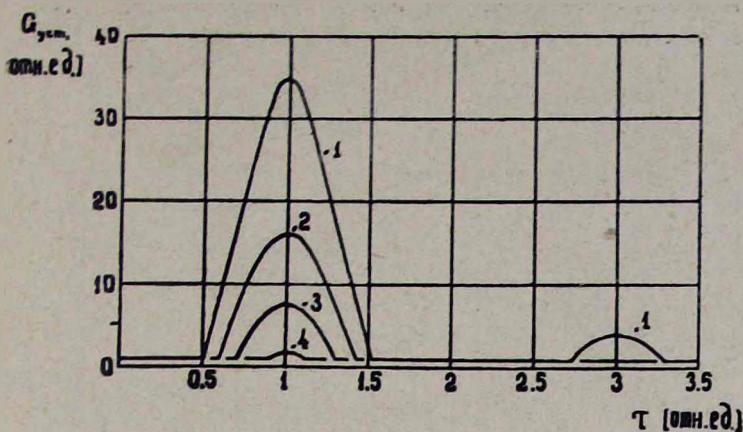


Рис. 4. Семейство зависимостей установившихся значений прямой проводимости условной связи от величины межстимульного интервала при различных значениях порога обучения.

Пример кривой обучения при вероятностном подкреплении (50%) приведен на рис. 5Б. Как видно, имеет место облегчение временной связи, что согласуется с экспериментальными данными.

Рис. 5 В и Г иллюстрируют эксперимент, когда имеет место облегчение как прямой, так и обратной связей, причем кривые обучения на рис. 5Г отражают типичное свойство двусторонних условных рефлексов. В начале эксперимента по выработке условного рефлекса облегчается как прямая так и обратная связи, однако в последующем, по мере развития и укрепления прямой связи, обратная связь угасает. Это соответствует известным экспериментальным данным [6].

Результаты проведенного исследования модели методом машинного моделирования показывают, что учет динамики процессов в корковых центрах и их влияния на элементы временной связи на основе предложенных нелинейных дифференциальных уравнений, позволяет имитировать ряд свойств временной связи, не нашедших отражения в известных по доступной литературе моделях условных рефлексов. К числу их относятся чувствительность к порядку предъявления стимулов и временным соотношениям между ними. Получены кривые обучения, зависящие от величины межстимульного интервала и имеющие оптимальные характеристики при его определенных значениях. Смоделированы эффекты перестройки условной связи в связи с переменной порядка предъявления стимулов и одновременного облегчения прямой и обратной связей при некоторых параметрах модели. Возможность учета всех этих факторов свидетельствует о том, что модель отражает основные феномены двусторонней условной связи.

Вместе с тем, ряд известных проявлений условнорефлекторной деятельности не поддается описанию как в рамках известных, так и предло-

женной моделей. К числу таких феноменов относятся, например, явления запаздывательного и запредельного торможения.

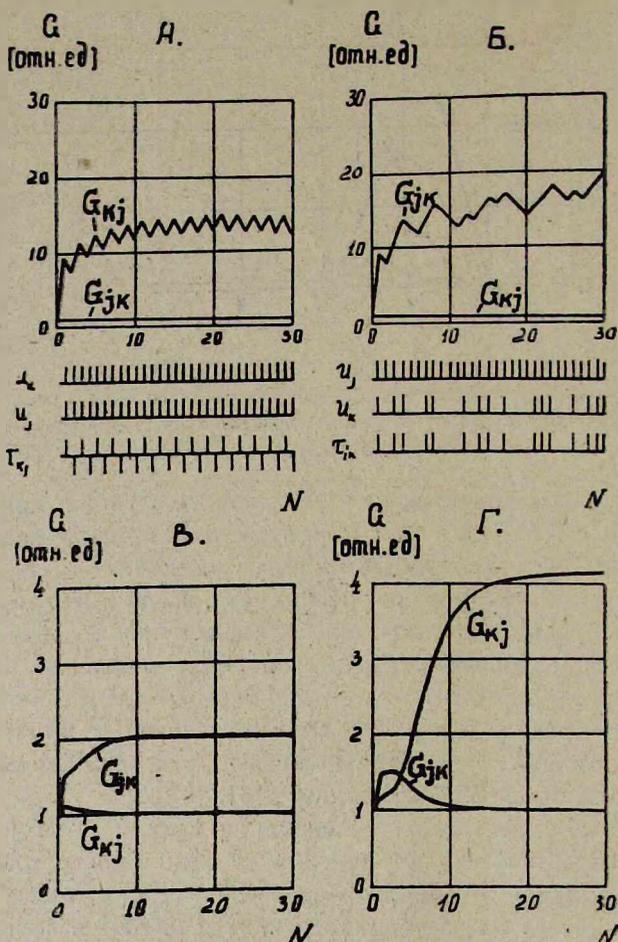


Рис. 5. А. Кривая обучения при попеременном сочетании. Б. Кривая обучения при 50% вероятностью подкрепления. В и Г—кривые обучения, в которых проявляются эффекты прямых и обратных связей.

Некоторые из неучтенных свойств могут быть описаны путем усложнения модели, например, введением переменного коэффициента чувствительности по обучению ($K_{об}$) или путем параллельного соединения цепочек, имитирующих элементы условной связи. Однако многие вопросы, связанные с дальнейшим усложнением моделей условных рефлексов, требуют учета дополнительных фактов относительно микроструктурных основ процессов замыкания временных связей.

ԵՐԿԿՈՂՄԱՆԻ ԿԱՊՈՎ ԿԼԱՍԻԿ ՊԱՅՄԱՆԱԿԱՆ ՌԵՖԼԵՔՍԻ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼ

Գ. Ս. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ, Կ. Ս. ԲԱԲԱՅԱՆ

Հոդվածում առաջարկվում է երկկողմանի կապով դասական պայմանական ռեֆլեքսի մաթեմատիկական մոդել՝ ըստ է. Չ. Հասրաթյանի Դիտվում է երկու ոչ պայմանական ռեֆլեքսների կեղևային կենտրոնների միջև ժամանակավոր կապի համարժեք էլեկտրական սխեմա, որի հիման վրա կառուցվում է պայմանական ռեֆլեքսների ստեղծման և մարման պրոցեսների դինամիկական նկարագրող հավասարումների համակարգությունը: Համաձայն մշակված մոդելի հավասարումների, կառուցվում է պայմանառեֆլեքսային գործունեության այս կամ այն հատկությունները արտացոլող դինամիկ կորիերի հաշվարկման ալգորիթմը: Բերվում են «ՆԱԻՐԻ—2» էԹՀՄ-ի վրա ստացված մեքենայական փորձերի արդյունքները, որոնցում հետազոտված են ժամանակավոր կապի ստեղծման և մարման պրոցեսները, ուսուցման բնութագրերի կախվածությունը միջազդանշանային տևողությունից և երկկողմանի պայմանական կապերի հիմնական հատկությունները:

MATHEMATICAL MODEL OF CLASSICAL CONDITIONED
REFLEX WITH BILATERAL CONNECTION

D. S. MELKONIAN, K. S. BABAIAN

The mathematical model of classical conditioned reflex with bilateral connection is suggested based on the classical scheme of Asratian. The dynamic characteristics of the model are investigated by using the technique of modelling on a digital computer. By changing the parameters of the model and its input variables it has been shown that a family of learning curves could be obtained which stimulates dynamical dependences between conditioned and unconditioned stimuli.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. McCulloch W. S. and Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. Math. Biophys., 5, 115—133, 1943.
2. Гавроньски Р. Прогресс биологической и медицинской кибернетики. 187, М., 1974.
3. Асратян Э. А. Физиология центральной нервной системы, М., 1953.
4. Асратян Э. А. Журн. высш. нервн. деят., 21, 3, 1971.
5. Прессман Я. М. Суммационная реакция и условный рефлекс. М., 1973.
6. Гасто Г. Ретикулярная формация мозга, 496, М., 1962.