

ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА, ОСНОВАННОГО НА АКТИВНОСТНОЙ ПАРАДИГМЕ

Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. Г. Семёнов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 29.10.2011 г.

Аннотация. Проведено исследование компьютерной модели нейрокомпьютерного интерфейса (НКИ), использующего активностную психофизиологическую парадигму. В серии вычислительных экспериментов определены входные параметры модели, использование которых обеспечивает высокую вероятность достижения управляемым объектом поставленной цели. Полученные результаты создают основу для разработки нового поколения НКИ.

Ключевые слова: нейрокомпьютерный интерфейс, человеко-машинное взаимодействие, математическое моделирование, электроэнцефалограмма.

Annotation. Research is conducted on a computer model of Brain-computer interface (BCI) which is based on the activity psycho-physiological paradigm. In a series of computing experiments a set of model parameters is determined aiming to maximize the probability of achieving a predetermined target by the managed object. The results serve as basis for the development of new generation BCIs.

Keywords: Brain-computer interfaces, Human-computer interaction, mathematical modeling, electroencephalogram

ВВЕДЕНИЕ

Оценивая результаты разработки систем нейро-компьютерного интерфейса (НКИ), можно сделать вывод, что, несмотря на большой эмпирический материал, накопленный как в этой области исследований, так и в смежных областях [1], в частности, при создании систем биологической обратной связи, в рамках НКИ пока ещё существует немного моделей человеко-машинного взаимодействия, имеющих прогностическую ценность.

Прогнозирование эффективности работы НКИ и учёт индивидуальных особенностей пользователя позволит существенно приблизить технологию НКИ к конечному потребителю. В этой связи существенную роль в создании подобных моделей НКИ может сыграть использование активностной психофизиологической парадигмы, постулирующей наличие у управляющего объекта модели результата действия ещё до начала самого действия [2].

Целью данной работы является создание компьютерной модели человеко-машинного взаимодействия в рамках НКИ на основе активностной парадигмы с использованием методов

теории игр [3] и её апробация путем проведения вычислительных экспериментов.

МОДЕЛЬ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА НА ОСНОВЕ АКТИВНОСТНОЙ ПАРАДИГМЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используемая в настоящей работе математическая модель НКИ представлена в [4–7]. В настоящей работе будет показана возможность применения активностной парадигмы для создания технологии НКИ. Часть НКИ, включающую в себя аппаратную часть и алгоритмы, обеспечивающие интерпретацию паттернов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и превращение их в команды управления внешними устройствами, будем называть программно-аппаратным комплексом (ПАК) НКИ. Выбор стратегии (алгоритма) действий как человека (пользователя), так и ПАК будет осуществляться, исходя из максимизации выигрыша, определяемого для пользователя как относительное уменьшение расстояния до намеченной цели, а для НКИ – как мера уменьшения длины хода. При проведении вычислительных экспериментов будет решаться вопрос – позволяют ли пользователю разработанные алгоритмы оценки вы-

игрыша ПАК достичь намеченной цели в используемой модели, например, переместить робот-тележку или курсор на экране монитора в заданную область пространства. Можно ли предсказать успешность или неуспешность такого действия до его начала, используя только входные данные модели?

Взаимодействие пользователя и ПАК в модели [4–7] определяется матрицей игры, в которой строки соответствуют стратегиям пользователя, а столбцы – стратегиям ПАК (см. табл.1). В ячейку таблицы помещаются два значения: длина хода (например, расстояние в пикселях, если речь идёт о перемещении курсора на экране), на которое переместится объект, – это первое число в ячейке в табл. 1 и угол, устанавливающий, в каком направлении из данной точки происходит следующий ход в двумерном пространстве (второе число в ячейке в табл. 1). Таким образом, в ячейке таблицы находятся данные для формирования команды на выполнение определенного действия, например, на перемещение курсора или робота-тележки в заданное место пространства.

На рис.1 представлена схема перемещения курсора по экрану монитора, используемая для программного пакета, моделирующего работу НКИ.

Рассмотрим пример осуществления выбора стратегий пользователем и ПАК. Для уменьшения расстояния между текущим положением объекта и целью, то есть для получения выигрыша пользователем, ему следует в табл. 1 выбрать вторую строку, поскольку она содержит ходы с углами, соответствующими требуемым направлениям достижения конечной точки – 0° и 90° . В случае отсутствия строк, все ячейки

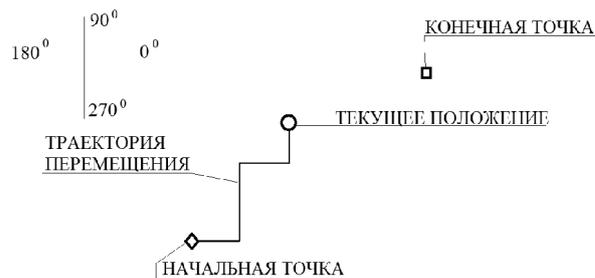


Рис. 1. Схема перемещения курсора на экране монитора компьютера

которых имеют необходимые углы, одной из возможных стратегий для пользователя является выбор строки, содержащей максимальное по сравнению с другими количество ходов с необходимыми для приближения к цели углами. Например, в случае отсутствия в табл. 1 второй строки приоритет в выборе пользователя получает четвертая строка (в ней три ячейки с нужными углами), более низкий приоритет – у первой строки (в ней две таких ячейки) и самый низкий приоритет – у третьей строки (в ней только одна такая ячейка). В выбранной пользователем строке в соответствии с правилом максимизации выигрыша ПАК находит «минимальный» ход (то есть ход с минимальным расстоянием, которое надо будет пройти), соответствующий его стратегии, представленной во второй строке таблицы. Таким образом, этот ход будет совершен в направлении, характеризующимся углом 90° , на 5 единиц расстояния.

В ходе вычислительного эксперимента нужно было найти значения параметров матрицы выбора стратегий (МВС), при которых достигается цель, поставленная пользователем. Помимо этого ставилась задача определить: влияет

Таблица 1

Пример стратегий пользователя и ПАК. В ячейках находятся два значения: длина хода и угол направления следующего хода

		Стратегии ПАК			
		Стратегия №1	Стратегия №2	Стратегия №3	Стратегия №4
Стратегии пользователя	Стратегия №1	5; 90°	15; 90°	10; 270°	20; 180°
	Стратегия №2	10; 90°	5; 0°	20; 90°	10; 0°
	Стратегия №3	15; 90°	15; 270°	20; 180°	5; 180°
	Стратегия №4	20; 0°	5; 90°	10; 0°	10; 270°

ли на полученный результат изменение взаимного расположения: а) ходов в ячейках МВС и б) начальной и конечной точки перемещения курсора. При решении этих задач можно создать такую систему команд НКИ на основе активной парадигмы, практическое применение которой даст заметные преимущества по сравнению с другими уже разработанными ранее системами команд, не учитывающими к тому же особенности их использования при разных направлениях движения устройств, управляемых пользователем.

В качестве меры оценки достижения результата применительно к модельному НКИ были выбраны следующие параметры:

– Результат достижения или недостижения пользователем цели (например, заданной области пространства, что соответствует перемещению курсора в определенную область экрана).

– Коэффициенты корреляции по Спирмэну [8] между выигрышем пользователя и выигрышем ПАК. Предполагалось, что в этом случае «синергетического» взаимодействия пользователя и ПАК будет обеспечен оптимальный результат, заключающийся в том, что росту выигрыша пользователя будет соответствовать и увеличение выигрыша ПАК. В дальнейшем мы будем называть этот коэффициент корреляции «коэффициентом синергии».

– Коэффициенты корреляции по Спирмэну между выигрышем пользователя и длиной хода, а также между выигрышем ПАК и длиной хода. Предполагалось, что в первом случае не будет корреляции, так как выигрыш пользователя рассчитывается, исходя из относительного уменьшения расстояния до цели. Во втором случае, так как ПАК выбирает самый короткий ход из всех возможных, находящихся в строке таблицы, корреляция также должна отсутствовать.

На первом этапе эксперимента была случайным образом сгенерирована матрица МВС размерностью 11×11, углы для следующего хода принимали значения, кратные 90°, а длина хода изменялась от 0 до N, причем значение N было много меньше расстояния от начальной точки движения пользователя до конечной точки (до цели). Полученная матрица «поворачивалась» на углы 90°, 45° или 15°. Поворотом матрицы будем называть процесс перемещения значений матрицы по ячейкам, так что ячейки, находя-

щиеся на равном расстоянии от центральной, будут перемещены на одинаковое количество ячеек при сохранении расстояния до центральной. Этот поворот нужен для проверки возможных вариантов взаиморасположения начальной и конечной точек траектории и двух блоков элементов матрицы: углов поворота траектории и длины хода. Если повороты МВС на углы 90° и 45° являются тривиальными, то поворот на угол 15° таковым не является, в первую очередь, потому что изменение координат ячейки является в этом случае неочевидным.

Рассмотрим процесс поворота матрицы МВС на угол 15° (рис. 2). Отсчет координат ячеек будем вести от левого нижнего угла матрицы. Центром матрицы в данном случае является ячейка с координатами (6, 6), на рис. 2 эта ячейка (№ 61) выделена серым цветом.

		СТРАТЕГИИ ПАК										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
СТРАТЕГИИ «ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ»	1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	2	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	3	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
	4	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
	5	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
	6	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
	7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
	8	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
	9	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
	10	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121

Рис. 2. Пример поворота матрицы МВС на угол 15°. Условное начало координат для поворота – ячейка № 61 – выделена серым цветом. Δ – угол поворота матрицы. Стрелкой показано направление перемещения значений ячеек матрицы

Рассмотрим ячейку с координатами (11, 6) (ячейка № 66 на рис.2) и определим, как изменятся её координаты при повороте МВС против часовой стрелки на 15°. Решив тригонометрическую задачу, получим новые координаты ячейки – (11,9). Таким образом, в строках и столбцах, соответствующих краям матрицы МВС, произойдет «сдвиг» ячеек против часовой стрелки на три ячейки. Чем больше размер матрицы, тем точнее выполнится поворот ячеек её «периферии», так как крайние ячейки матрицы соответствуют меньшим значениям угла и, следовательно, используя их координаты,

можно более точно переместить необходимые ячейки. По этой же причине ячейки, находящиеся вблизи центра поворота (вблизи ячейки с координатами (6,6)), движутся «менее точно» (то есть их перемещение лишь приблизительно соответствует изменению координат).

По сути, каждая область матрицы МВС, находящаяся на определенном расстоянии от центра, изменяет значения своих элементов при повороте со своим углом, индивидуальным для каждой величины радиуса, то есть расстояния от текущей ячейки до центра матрицы, приближенно описываемого указанным выше способом, связывающим расстояние от центра матрицы с углом её поворота.

На первом этапе проведения вычислительных экспериментов матрица МВС генерировалась случайным образом для набора углов с указанными выше шагами и при постоянных значениях длин ходов пользователя, которые были много меньше расстояния до цели перемещения курсора.

Результаты компьютерного моделирования работы НКИ для случайной генерации длины хода и углов поворота представлены на рис. 3 и 4 (черные круглые маркеры). Вследствие случайной генерации значений углов ни в одном из 289 проведенных вычислительных экспериментов цель (то есть попадание курсора на экране монитора в заданную область) не была достигнута. Применительно к НКИ это означает, что ни в одном из случаев пользователь не может переместить курсор в заданную точку экрана.

Однако при этом в результате учета эффекта множественных сравнений (корреляций) получена зависимость между коэффициентами корреляции, отражающими взаимосвязь выигрышей пользователя и ПАК НКИ с длиной хода и коэффициентом синергии. Эта зависимость представлена на рис. 3–4.

Если взаимодействие пользователя и ПАК является «антагонистическим»: выигрыш одного приводит к проигрышу другого, то к выигрышу пользователя приводят ходы более длинные по сравнению с ходами, не приводящими к выигрышу, то есть перемещение курсора на большие расстояния. Следовательно, наиболее выгодным для пользователя является перемещение курсора на экране большими «скачками» (с большими величинами длин ходов). С другой стороны, там, где отношения пользователя и ПАК «синергичны» (в области положительных

значений коэффициента синергии), большой выигрыш пользователя обеспечивает меньшая длина хода, то есть перемещение курсора на экране монитора на меньшее расстояние.

Взаимосвязь коэффициента синергии и коэффициента корреляции выигрыша пользователя и длины хода представлена на рис. 4 (круглые маркеры для случайной генерации МВС). Видно, что, несмотря на высокую значимость выявленной закономерности ($r = 0.27$, $p = 4 \cdot 10^{-6}$, где r – это коэффициент корреляции Спирмэна, а p – это вероятность того, что выявленная зависимость случайна), данная зависимость является нелинейной. В ней выделяются два множества значений, соответствующие разным величинам коэффициента корреляции, отражающим отношения между выигрышем ПАК и длиной хода. Для первого множества характерно, что с ростом коэффициента синергии растёт связь между длиной хода и выигрышем ПАК, для второго множества рост коэффициента синергии приводит к обратному эффекту – ПАК выбирает наиболее короткие ходы, чтобы добиться максимального выигрыша.

Во второй серии из 96 экспериментов была исследована компьютерная модель НКИ в условиях, когда длина каждого хода одинакова и много меньше расстояния до цели перемещения курсора, а углы направления движения курсора в начальном положении МВС задавались разными в диапазоне от 0° до 360° . При этом в начальном положении матрицы в одной строке (то есть для стратегии пользователя) присутствовал только один угол. Значения углов нарастали от 0° до 360° от первой строки МВС к последней с шагом 90° , 45° или 15° . Естественно, что при повороте матрицы в её строках появляются новые комбинации углов. В конечном итоге, ни в одном из экспериментов, за исключением первого, цель (попадание курсора в заданную область пространства) не была достигнута. Достижение цели в первом эксперименте объясняется равенством углов направления движения пользователя для каждой ячейки МВС. Таким образом, полученная матрица не позволяет провести выбор направления для ПАК, и, следовательно, выбор направления осуществлялся только пользователем. Недостижение цели в остальной серии экспериментов связано с отсутствием вращения матрицы длины ходов, что приводило к типовому выбору только одной ячейки в строке независимо от

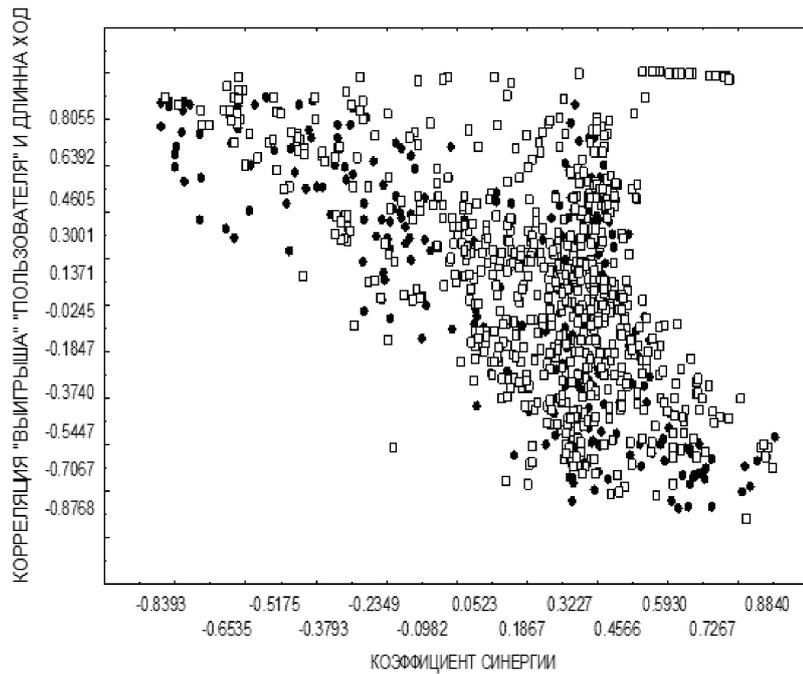


Рис. 3. Взаимосвязь коэффициента синергии и коэффициента корреляции длины хода и выигрыша ПАК. Черные круглые маркеры – результаты в случае, если МВС сгенерирована случайным образом. Белые квадратные маркеры – результаты моделирования, полученные при равенстве длин ходов, угол поворота траектории пользователя в начальном положении матрицы растёт от значения 0° до 360° с шагом 15° , 45° и 90° от первой строки таблицы к последней, оставаясь постоянным в каждой строке

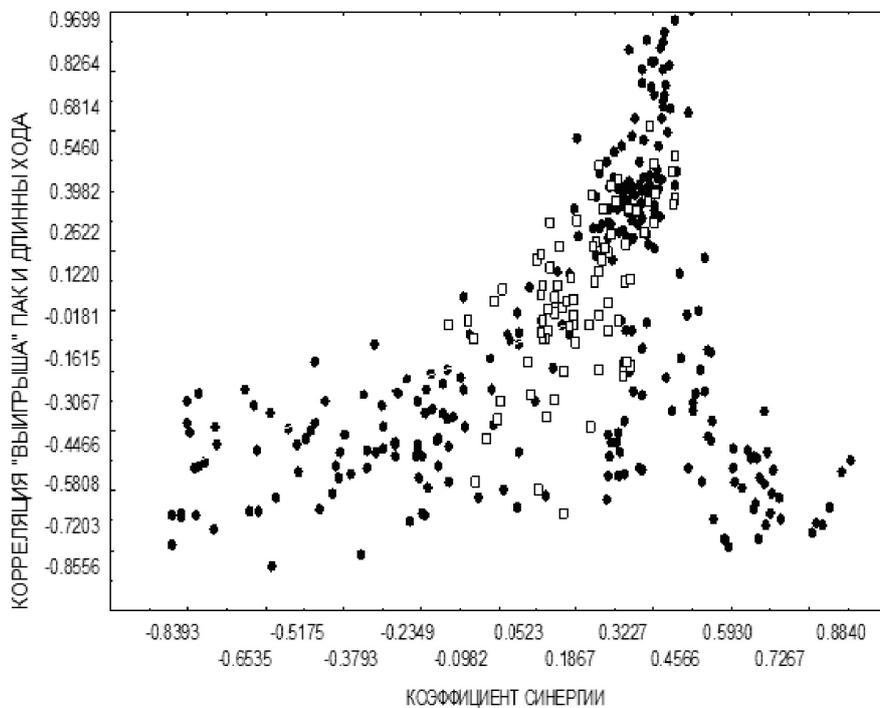


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента синергии и коэффициента корреляции выигрыша пользователя и длины хода. Обозначения те же, что и на рис. 3

поворота остальных элементов матрицы. На рис.4 маркеры прямоугольной формы, соответствующие данной серии экспериментов, формируют одну из «ветвей» множества коэффициентов корреляции. При этом рост коэффициента синергии сопровождался достоверным увеличением выигрыша ПАК при увеличении длины хода ($r = 0.57, p << 10^{-4}$).

На третьем этапе в серии из 769 вычислительных экспериментов, помимо упорядоченных значений углов, соответствующих направлению движения курсора, так же были упорядочены и значения длин ходов. Таким образом, в начальной МВС в одной строке были одинаковые значения углов, соответствующие направлению движения курсора, и равные длины ходов, которые по-прежнему были много меньшими расстояния, необходимого для достижения цели.

Результаты моделирования НКИ с данной МВС представлены на рис 5. Как видно из этого рисунка, в общем случае (и квадратные, и круглые маркеры на рис.5) результаты работы модели НКИ на основе активностной парадигмы не зависят от того, сгенерированы ли значения матрицы игры случайным образом или она сформирована из упорядоченных линейным

образом увеличивающихся значений длин ходов и углов траекторий движения. Тем не менее, в отличие от предыдущих экспериментов в 147 случаях (19% от их общего числа 769) был достигнут результат в виде перемещения курсора в требуемую область экрана.

Для определения факторов (входных параметров модели и результатов её работы), обеспечивающих успех данной группы экспериментов (попадание курсора в заданную область экрана), был использован метод C&RT (Classification and Regression Tree – построение деревьев классификации и регрессии) и дискриминантное одномерное ветвление [9], реализованные в программном пакете STATISTICA 6.1.

Количество неправильно классифицированных результатов достижения и недостижения цели находилось в пределах от 11% до 16% в зависимости от метода классификации и переменных, по которым она осуществлялась. При использовании прогноза одновременно по всем параметрам как для матрицы, включая углы поворота МВС, так и для результатов моделирования в виде коэффициентов корреляции, было получено, что наибольший прогностический вес имеет коэффициент синергии, который

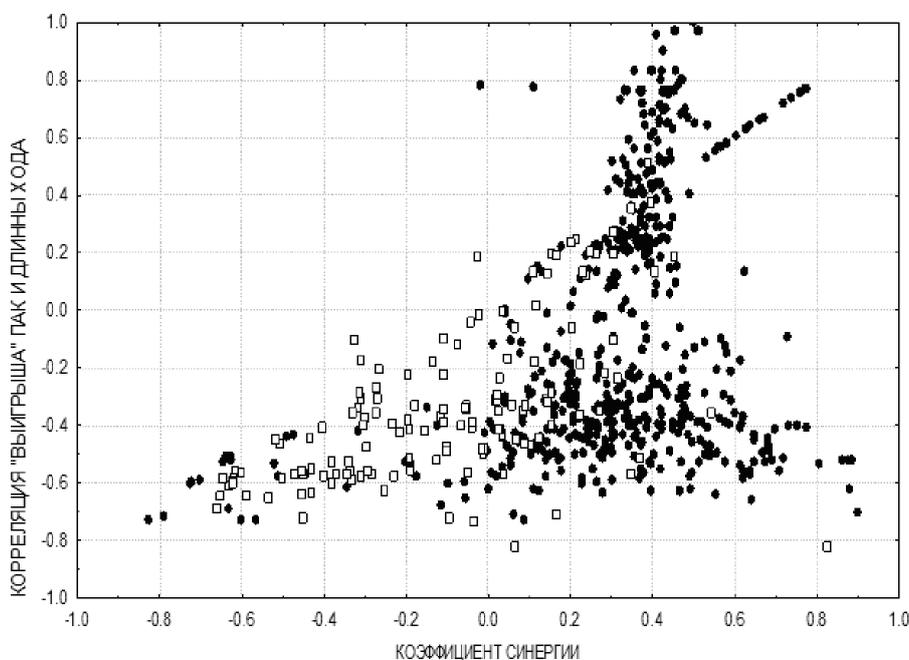


Рис. 5. Результаты вычислительных экспериментов в условиях изменения и угла направления хода, и длины хода. Квадратные маркеры – результаты экспериментов, в которых курсор был перемещён в требуемую область пространства, круглые маркеры – результаты экспериментов, где за 100 ходов достигнуть нужной цели не удалось

один уже обеспечивает классификацию до 11% уровня ошибок. При этом граница его значений, по которой осуществлялась классификация достижения или недостижения цели пользователем, проходила в области малых положительных и/или отрицательных значений коэффициента синергии ($-0.11, 0.26$), что следует, например, из рис. 5, в то время как в случае высоких положительных коэффициентов синергии (> 0.2) достигнуть намеченной цели пользователь в подавляющем большинстве случаев не может. Из рис. 5 также видно, что выигрышу соответствуют не только более низкие (как указано выше) коэффициенты синергии, но и отрицательные значения коэффициента корреляции между длиной хода и выигрышем ПАК. Таким образом, более короткие ходы дают больший выигрыш для ПАК, что очевидно для представленной здесь модели, при этом также выигрывает и пользователь, достигший намеченной цели.

Отметим, что коэффициенты корреляции рассчитываются по окончании всей серии ходов, то есть по завершении процесса моделиро-

вания. Они, таким образом, не могут использоваться в модели для прогноза при выборе оптимальной матрицы до начала работы пользователя с НКИ. Для устранения данного недостатка модели было проведено несколько серий классификации с использованием «деревьев классификации», где факт достижения пользователем заданной цели требовалось предсказать, исходя из параметров взаиморасположения в МВС длин ходов и углов поворота траектории, выходящей из точки, соответствующей текущему положению курсора.

Полученные при проведении вычислительного эксперимента результаты представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, во всех случаях наиболее значимым параметром является угол поворота матрицы МВС, содержащей углы изменения траектории движения, но при этом изменения значений длин ходов незначимо. То есть ключевым для достижения нужного результата (требуемой области пространства) является не длина хода (как следует из расчетов выигрышей пользователей и ПАК, которые должны направлять движение курсора), а толь-

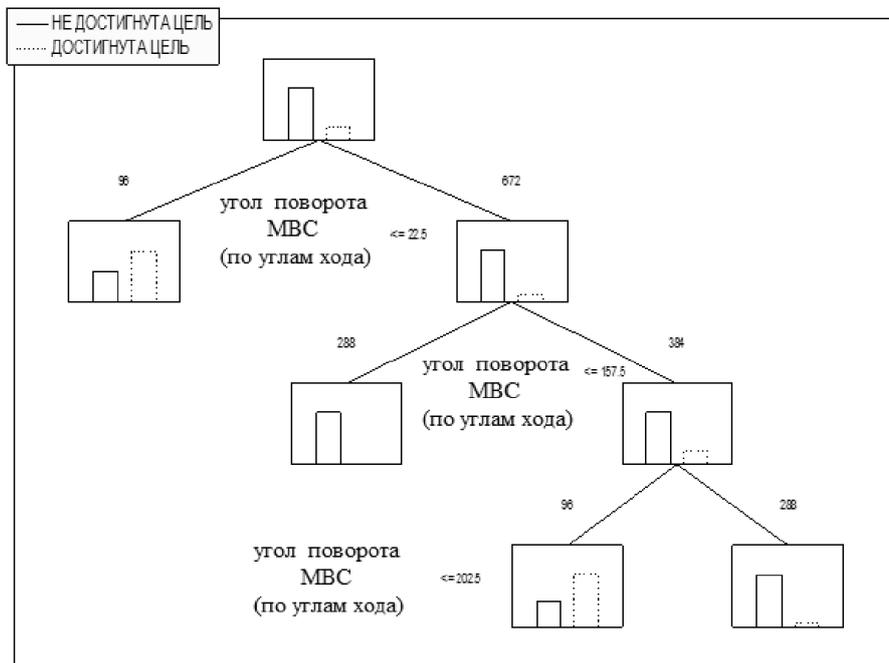


Рис. 6. Граф, являющийся результатом прогноза достижения или недостижения определённой области пространства в ходе использования компьютерной модели при различных углах поворота части МВС, несущей информацию об углах изменения траектории движения объекта управления. Из верхнего узла, являющегося корнем графа, идёт бифуркация. Рядом с бифуркацией указано условие, полученное в ходе работы программного пакета STATISTICA 6.1, необходимое для дробления исходного множества (в данном случае угол поворота МВС должен быть меньше 22.5°). В каждом узле (включая терминальные) находится гистограмма, указывающая количества случаев достижения и недостижения цели.

Над каждым узлом графа указано число экспериментов, соответствующих данному узлу

ко направление хода. Подобный результат позволяет сформулировать новые требования к имеющимся моделям на основе активностной парадигмы. Ключевыми из этих требований является разработка особой структуры команд на изменение траектории движения курсора или робота-тележки.

Следует отметить, что при классификации факторов, влияющих на достижение поставленной цели, значительно более точный прогноз был связан именно с недостижением цели (до 4.5% ошибок прогноза), а не с перемещением курсора в нужную область (до 30% ошибок прогноза). Таким образом, используя математическую модель [4–7], можно создать алгоритмы, управляющие движением курсора «от противного». Иными словами, наряду с конструированием МВС, обеспечивающей достижение цели, можно сформировать такую МВС, которая, наоборот, не даст пользователю необходимую траекторию перемещения курсора, с тем, однако, чтобы в дальнейшем исключить или, по крайней мере, снизить вероятность её реализации в создаваемом НКИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных вычислительных экспериментов с применением предложенной компьютерной модели продемонстрировали принципиальную возможность создания НКИ, основанного на активностной парадигме. Найден ряд входных параметров модели НКИ, связанных с группировкой длины хода и угла изменения траектории перемещения в МВС, что необходимо для создания классификаторов, обеспечивающих анализ паттернов электроэнцефалограмм для цели управления внешними устройствами, функционирующими в двумерном пространстве.

Туровский Ярослав Александрович – кандидат медицинских наук, доцент кафедры цифровых технологий, руководитель лаборатории информационных технологий в медицине факультета компьютерных наук; тел.: (473) 2-208-384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Кургалин Сергей Дмитриевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой цифровых технологий факультета компьютерных наук; тел.: (473) 2-208-384, e-mail: kurgalin@bk.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сороко С.И., Трубачев В.В.* Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. – СПб., Политехника-сервис, 2010. – 607 с.
2. *Основы психофизиологии: Учебник / Отв. ред. Ю. И. Александров.* – М.: ИНФРА-М, 1997. – 349 с.
3. *Петросян Л. А.* Теория игр: учеб. пособие для ун-тов // Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина. – М.: Высш. шк., книжн. дом «Университет», 1998. – 304 с.
4. *Туровский Я.А.* Моделирование нейрокомпьютерного интерфейса на основе активностной парадигмы // Я.А.Туровский, С.Д.Кургалин, А.В.Максимов / Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 1(47). – С. 35–38.
5. Математическая модель для исследования нейрокомпьютерного интерфейса / С.Д. Кургалин, Я.А. Туровский, А.В. Максимов [и др.] // Телематика'2010 : тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. – СПб, 2010. – Т. 2. – С. 370–371.
6. Математическая модель нейрокомпьютерного интерфейса и оценка эффективности взаимодействия человек-компьютер / С. Д. Кургалин, Я. А. Туровский, А.В. Максимов [и др.] // Физико-математическое моделирование систем : материалы VI Международ. семинара. – Воронеж, 2010. – Ч. 3. – С. 52–55.
7. Математическое моделирование нейрокомпьютерного интерфейса / Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, А.В. Максимов [и др.] // Информационные технологии в науке и образовании : материалы Международ. науч.-практ. конф., Железноводск, 11–12 февр. 2010 г. / Под ред. А.Э. Попова. – Шахты, 2010. – С. 75–77.
8. *Ефимова М.Р.* Общая теория статистики / М. Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцев; под общ. ред. М.Р. Ефимовой. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 416 с.
9. http://www.statsoft.ru/statportal/tabID__50/MId__449/ModeID__0/PageID__317/DesktopDefault.aspx

Turovsky Yaroslav Aleksandrovich – Candidate of Medical Science, Associate Professor of the Digital Technologies Department, Head of the Digital Medical Technologies Laboratory of Computer Science Faculty; tel.: (473) 2-208-384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Kurgalin Sergey Dmitrievich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Head of the Digital Technologies Department of Computer Science Faculty; tel.: (473) 2-208-384, e-mail: kurgalin@bk.ru

Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. Г. Семёнов

Семёнов Александр Германович – студент
факультета компьютерных наук; тел.: (919)
2-484-121, e-mail: smallcsf@gmail.com

Semenov Aleksandr Germanovich – Student
of Computer Science Faculty; tel. (919) 2-484-
121; e-mail: smallcsf@gmail.com