

УДК 007.51:004.94

Е-СЕТЕВОЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОЛЬНЫХ И НЕПРОИЗВОЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

М. Я. Брагинский, Д. В. Тараканов

Сургутский государственный университет, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

В статье рассматривается построение модели нижнего уровня произвольных и непроизвольных движений руки человека-оператора с использованием метода адаптивной идентификации. В качестве математического аппарата идентификации параметров уровня регуляции локальных движений предлагается использовать динамическую нейронную сеть. Представленное решение позволяет проводить параметрическую идентификацию сложных объектов, в том числе и в реальном масштабе времени. В данной работе предлагается построение динамической модели локальных произвольных и непроизвольных движений руки человека-оператора в трехмерном пространстве. Тестирование искусственной нейронной сети для решения задачи идентификации осуществлялось в среде моделирования Matlab/Simulink. В представленной работе проиллюстрирована возможность использования аппарата Е-сетей в качестве математического аппарата моделирования разнородных взаимодействующих между собой процессов. Использование нейросетевой идентификации необходимо для моделирования логико-динамического уровня человека оператора и элементов автоматизированных систем управления технологическими процессами. Для построения модели верхнего уровня предлагается использовать модифицированные сети Петри – Е-сети, что позволяет эффективно решать задачу аналитико-имитационного моделирования сложных параллельных процессов. Отличительной особенностью предлагаемой модели является иерархичность, которая позволяет моделировать уровни детализации объектов и процессов в человеко-машинной системе.

Ключевые слова: Е-сети, человек-оператор, модель.

E-NETWORK HIERARCHICAL MODELING OF VOLUNTARY AND INVOLUNTARY MOVEMENTS OF A HUMAN-OPERATOR USING PARAMETRIC NEURAL NETWORK IDENTIFICATION

M. Ya. Braginsky, D. V. Tarakanov

Surgut State University, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

The building of the low-level simulation model of voluntary and involuntary hand movements with the help of the adaptive identification method is considered in the article. It is proposed to use the dynamic neural network as a mathematical apparatus for identifying the parameters of the regulation level of local movements. The presented solution allows carrying out parametric identification of complex objects, in real time as well. We propose the construction of the dynamic model of local voluntary and involuntary hand movements in three-dimensional space. The artificial neural network testing to solve the identification problem was carried out in the Matlab/Simulink simulation environment. The presented work illustrates the possibility of using the E-network apparatus as a mathematical apparatus for modeling heterogeneous interacting processes. The use of neural network identification is necessary for modeling the logical-dynamic level of a human-operator and elements of automated control systems for technological processes. For the construction of a top-level model, it is proposed to use modified Petri nets – E-networks, which allows solving the

problem of analytical and simulation modeling of complex parallel processes efficiently. The specific feature of the proposed model is the hierarchy, that allows modeling the levels of object details and processes in the human machine system.

Keywords: E-networks, human-operator, model.

Построение математической модели человека-оператора является актуальной задачей при решении ряда практических задач [1–3], как например построение компьютерного тренажера или создания человеко-машинных систем управления.

В настоящее время для контроля состояния человека-оператора используется регистрация его произвольных и непроизвольных движений [4–5] или изменений положения тела человека-оператора относительно кресла. Под креслом крепятся тензодатчики, электрические сигналы которых анализируются. По частоте колебаний в сигналах происходит диагностика утомления, снижения уровня бодрствования (засыпания) человека-оператора.

Большинство показателей физиологических процессов характеризуют напряженность всего организма, но далеко не всегда позволяют определить уровень работоспособности человека-оператора и прогнозировать ее изменение. Поэтому контроль одного физиологического показателя не может дать однозначного ответа о состоянии человека-оператора. Для повышения достоверных показателей в диагностике состояния человека-оператора необходимо одновременно анализировать значения целого комплекса показателей, принимать решение при сравнении этих значений.

При построении математической модели человека-оператора можно условно выделить два уровня имитации с точки зрения его функционирования:

- модель верхнего (логико-динамического) уровня, имитирующая процесс принятия решения человеком-оператором в аспекте взаимодействия с технологическим объектом;
- модель нижнего уровня, которая отражает деятельность систем органов человека, отвечающая за жизнеобеспечение и реализующая необходимые действия по управлению технологическим объектом.

Для моделирования логико-динамического уровня человека оператора и элементов автоматизированных систем управления технологическими процессами предлагается использовать расширенные сети Петри – Е-сети [6–9]. Возможность классификации, обобщающей способности и аппроксимации данных позволяет использовать нейронные сети в задачах моделирования поведения человека-оператора и осуществлять анализ качества работы обучаемого на тренажере.

В предыдущих работах рассматривалось построение аналитико-имитационной модели биомеханической структуры человека; модели, отражающей поструральную устойчивость человека в трехмерном пространстве как при наличии физической нагрузки и внешних стимулов, так и без них [10].

В представленной работе рассматривается построение модели нижнего уровня произвольных и непроизвольных движений человека-оператора с использованием метода адаптивной идентификации. В качестве математического аппарата идентификации параметров уровня регуляции локальных движений предлагается использовать динамическую искусственную нейронную сеть (ДИНС) [11]. Как известно, искусственные нейронные сети позволяют эффективно решать задачу идентификации сложных объектов [12–13].

В данной работе предлагается построение динамической модели (тремора) свойств человека-оператора в трехмерном пространстве как при наличии нагрузки и внешних стимулов, так и без нее. Исходные экспериментальные данные представлены в виде массивов данных, соответствующих изменению координаты положения пальца испытуемого во времени с шагом 0,02 с. и длительностью 5 с. Эти данные были получены с помощью автоматизированного комплекса на базе персонального компьютера с использованием дифференциальных датчиков микроперемещений [14].

Е-сетевая модель взаимодействия человека-оператора и объекта управления

представлена в виде Е-сетевой структурной схемы на рис. 1.

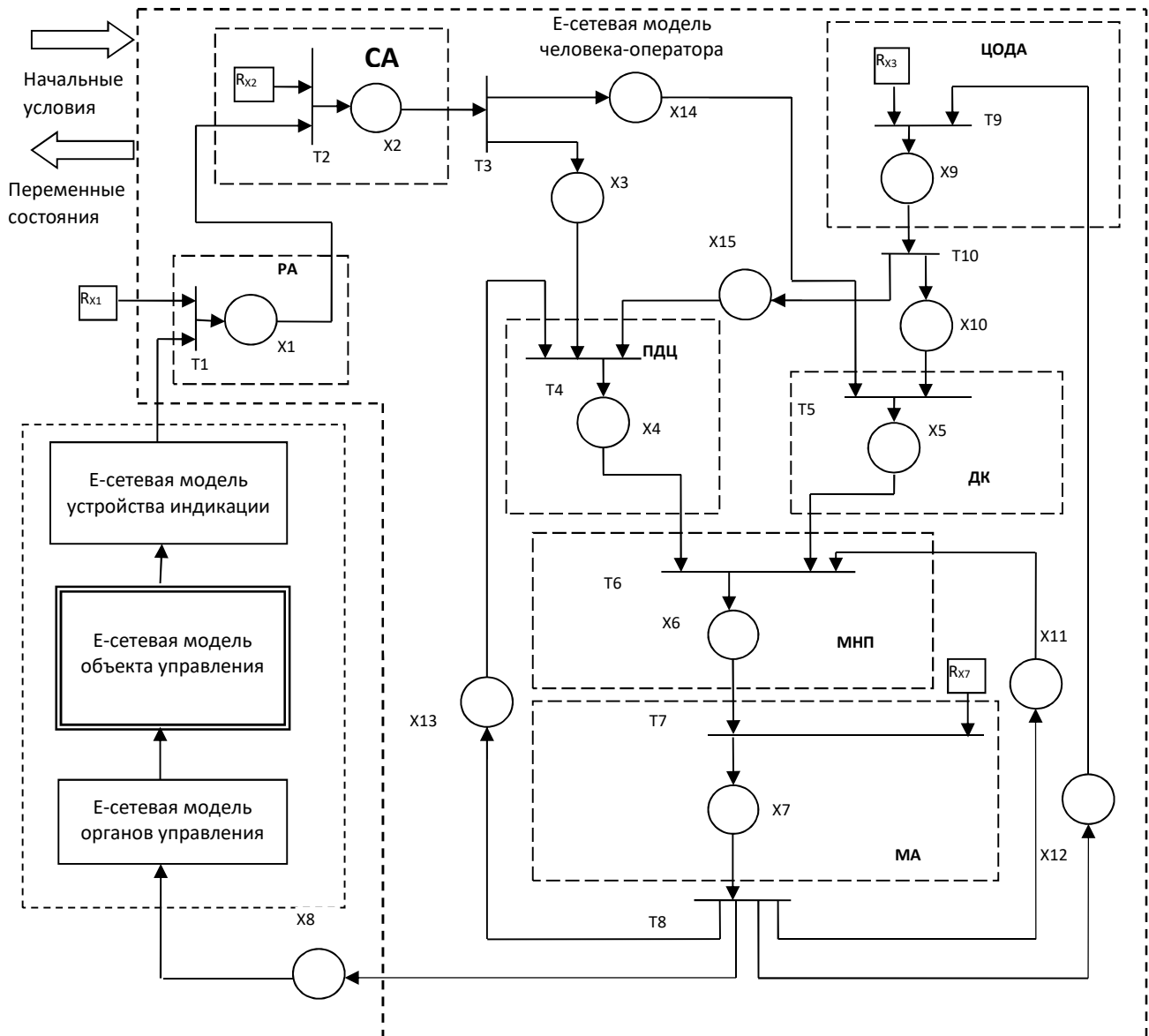


Рис. 1. Е-сетевая модель взаимодействия человека-оператора и объекта управления:

РА – рецепторный аппарат; СА – сенсорный анализатор;

ЦОДА – центральный отдел двигательного анализатора; ПДЦ – подкорковый двигательный центр;

ДК – двигательная кора; МНП – мотонейронный пул; МА – мышечный аппарат

Отличительной особенностью предлагаемой модели является иерархичность, которая позволяет моделировать уровни детализации объектов и процессов в человеко-машинной системе.

Начальные состояния Е-сети задаются маркировкой M_0 . При последовательном срабатывании переходов T_i происходит изменение состояния сети M_j .

Входными физическими переменными рассматриваемой системы моделирования являются информационные сигналы, излучаемые устройствами индикации, а также фоновые стимулы окружающей среды R_{x1} , имитируемые поступлением фишек через переход T_1 в подсеть рецепторного анализатора. Далее сигнал поступает через переход T_2 сенсорного анализатора в подсеть подкоркового двигательного центра (переход T_4), где содержится копия

образа необходимого движения (для активации органа управления), посылаемого центральным отделом двигательного анализатора, через переход T_{10} [15]. Команды на исполнение движением посылаются из двигательной коры (через переход T_6) в мотонейронный пул (двигательные нейроны), управляющий мышечным аппаратом.

Путь фишек через переходы T_8 , T_4 в подсеть мотонейронного пула является текущим корректирующим воздействием на процесс движения, а путь через переходы T_8 , T_9 в подсеть центрального отдела двигательного анализатора – информирующим о текущей фазе движения.

Выходными параметрами модели являются биомеханические характеристики движений человека-оператора при воздействии его мышечного аппарата на органы управления объектом (X_8).

В качестве входных стимулов для подсети мотонейронного пула используются выходы компонентов, моделирующих двигательную кору и подкорковый двигательный центр, а для имитации нагрузки на мышечный аппарат (исполнительный орган человека-оператора для активации устройств управления объектом) используется компонента модели R_{X7} .

Срабатывание перехода T_9 инициализирует требуемую динамическую нейронную сеть, которая запускает очередной цикл произвольных движений человека-оператора. В работе [16] рассмотрена задача построения искусственных нейронных сетей в Е-сетевом базисе моделирования, что позволяет интегрировать ИНС в рассматриваемую модель.

Работа ИНС включает в себя два этапа:

1. Процедура обучения ДИНС (настройки весовых коэффициентов и числа задержек).
2. Процедура имитационного моделирования биомеханических характеристик движений человека-оператора при заданных начальных воздействиях.

Для выполнения вышеуказанной задачи необходимо определить весовые коэффициенты и смещения ИНС, а также число элементов задержки. Авторами работы разработана ИНС, которая позволяет определять итерационно параметры ДИНС. Данная ИНС была протестирована в среде MatLab/Simulink. В качестве функционала качества работы используется среднеквадратичная ошибка. В результате обучения получена ДИНС, которая является фильтром с конечной импульсной характеристикой [17].

ДИНС работает следующим образом: исходный сигнал $U[nT]$ поступает на вход, где проходит последовательно через N задержек, в результате выходная реакция ДИНС определяется не только текущим, но и предыдущими значениями. Выходная реакция ДИНС вычисляется по следующему закону:

$$y[nT] = w_1 U[nT] + w_2 U[nT - 1] + \dots + b,$$

где w_i – весовые коэффициенты;

b – смещение;

n – номер такта;

T – период квантования.

Структура нейронной сети в среде MatLab представлена на рис. 2.

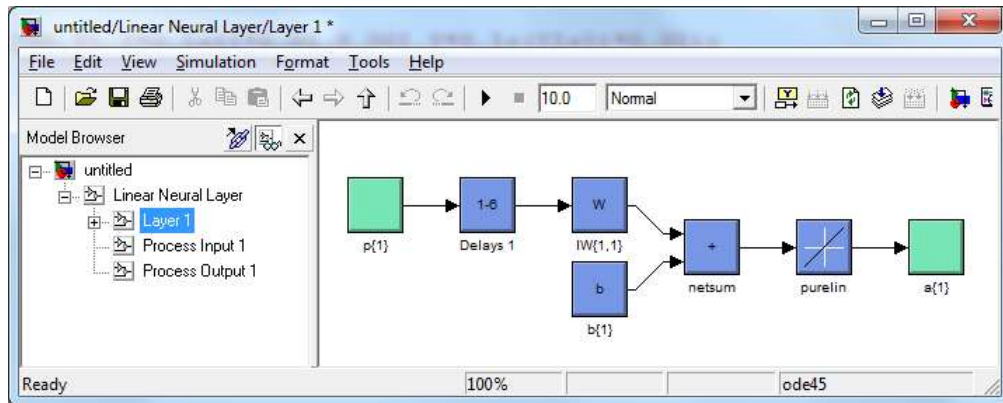


Рис. 2. Структурная схема нейронной сети:

$p(1)$ – блок входных сигналов; Delays 1 – блок задержек;
 $IW(1,1)$ – блок скалярного произведения вектора весовых коэффициентов на вектор входных данных;
 $b(1)$ – блок смещения; netsum – сумматор; purelin – линейная функция активации;
 $a(1)$ – блок выходных сигналов

В результате машинного обучения динамической нейронной сети на реальных данных, полученных при регистрации произвольных и непроизвольных движений руки получены параметры, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры обучения нейронной сети при различных типах движения руки

Тип движения руки	Весовые коэффициенты						Смещение b
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	
произвольное	0,2710	0,0905	0,0087	0,0070	0,0065	0,0061	0,5723
непроизвольное	0,2784	0,1397	0,0527	0,0131	0,0021	0,0009	0,4855

На рис. 3 представлены весовые коэффициенты ИНС в порядке возрастания номеров.

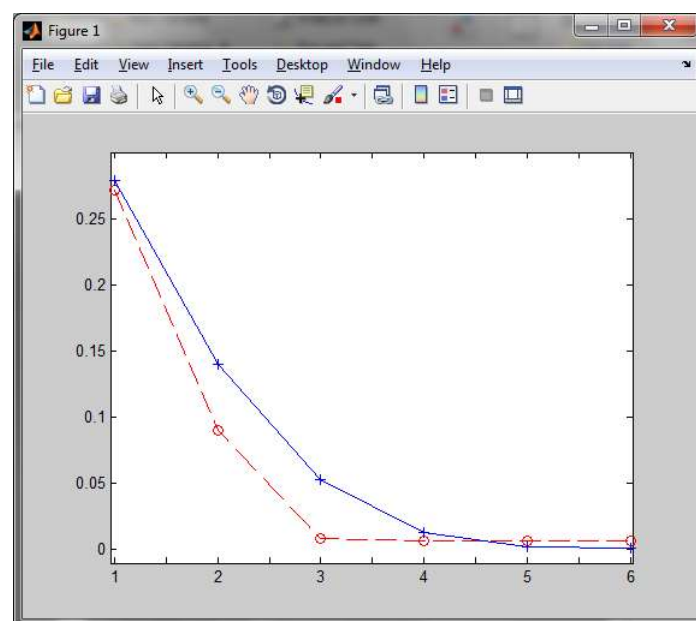


Рис. 3. Весовые коэффициенты ИНС, моделирующей произвольное движение руки (значения отмечены знаком «+») и непроизвольное движение (значения отмечены знаком «o»)

Значительное отличие весовых коэффициентов w_2 , w_3 , w_4 отражает динамические особенности двигательной системы человека в разных режимах работы. Произвольное движение руки (тип линии на графике – пунктир) характеризуется меньшей степенью свободы (амплитудой отклонений от заданной траектории). Непроизвольное движение руки (тип линии на графике – сплошная) характеризуется относительной свободой колебаний, что проявляется в большей амплитуде движений относительно удерживаемого положения конечности и согласовывается с ранее полученными результатами [18].

В представленной работе проиллюстрирована возможность использования аппарата Е-сетей в качестве математической аппарата моделирования разнородных взаимодействующих между собой процессов. Предложены двухуровневые математические модели человека-оператора, реализующие логический вывод принятия решения и имитирующие динамические свойства человека. Последняя задача выполнена с помощью нейросетевой идентификации. Использование представленной концепции может быть использовано при построении компьютерных тренажеров [19], проектировании и сопровождения технических систем.

Литература

1. Baron S., Kruser D. Quantitative modeling of human performance in complex, dynamic systems. Washington, DC : National Academies Press, 1990. 96 p.
2. Дружинин Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий М. : Наука ; Интерпериодика, 2000. 237 с.
3. Sheridan T. Humans and Automation: System Design and Research Issues. John Wiley and Sons, 2002. 261 p.
4. Semjen L., Lipshits M. Temporal control and motor control: two functional modules which may be influenced differentially during microgravity // II Human Movement Science. 1998. V. 17. P. 77–93.
5. Gurfinkel E. V., Lipshits M. I., Droulez J. Measurements of human force control during a constrained arm motion using a force-actuated joystick // J Neurophysiol. 1995. V. 73. № 3. P. 1201–1222.
6. Суконщиков А. А., Крюкова Д. Ю. Нейроподобные сети Петри при моделировании социальных процессов // Программ. продукты и системы вузов. № 2. 2011. С. 25–30.
7. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем : учеб. для студентов вузов. М. : Высш. шк., 2001. 342 с.
8. Peterson J. Petri net theory and the modeling of systems. Prentice-Hall, 1981. 290 p.
9. Tsapko S. G., Tsapko G. P., Tarakanov D. V., Savenko I. I. Organization of Continuous Process Simulation via E-network // Applied Mechanics and Materials (2015). V. 756. P. 500–506.
10. Брагинский М. Я., Бурыкин Ю. Г., Тараканов Д. В. Моделирование человеко-машинных систем с учетом влияния световых стимулов на человека-оператора // Вестник кибернетики. 2016. № 1. С. 63–73.
11. Leclercq E. et al. Petri nets design based on neural networks // ESANN 2008, 16th European Symposium on Artificial Neural Networks, Bruges, Belgium. April 23–25, 2008, Proceedings. P. 529–534.
12. Сочнев А. Н. Оптимизация функционирования систем с использованием нейросетевых моделей сетей Петри // Матем. моделирование. 2014. Т. 26. № 4. С. 119–128.
13. Best E., Fernandez C. Non-sequential Processes, a Petri Net View // EATCS Monographs on Theoretical Computer Science. Berlin, 1988. № 13.
14. Брагинский М. Я., Еськов В. М., Майстренко Е. В. Дифференциальный датчик для регистрации высокоамплитудного тремора : свидетельство Рос. Федерации на полезную модель № 24920 РОСПАТЕНТ. М., 2002.
15. Никандров В. В. Психомоторика : учеб. пособие. СПб. : Речь, 2004. 104 с.

16. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. Hierarchical analytical and simulation modelling of human-machine systems with interference // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 803 ; Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016) : International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation. P. 120–126.

17. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург. 2003. 736 с.

18. Брагинский М. Я., Еськов В. М., Климов О. В. К вопросу о произвольности и непроизвольности микродвижений конечности человека (треморе) // Вестн. новых мед. технологий. 2002. № 3. С. 42–45.

19. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. E-Network Modelling of Process Industrial Control Systems in Building Computer Simulators // Control and Communications (SIBCON) : Proceedings of the XII International Siberian Conference, Moscow. May 12–14, 2016. P. 185–191.