

4. *Vahrenkamp R.* Random search in the one-dimensional cutting stock problem // *European Journal of Operational Research.* – 1996. – Vol. 95, № 1. – P. 191-200.
5. *Скобцов Ю.А.* Основы эволюционных вычислений: Учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
6. *Michalewicz Z.* Genetic algorithms + data structures = evolution programs. – 3rd ed. – Berlin [etc.]: Springer-Verlag, 1998. – 387 p.
7. *Deb K.* An efficient constraint handling method for genetic algorithms // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 2000. – Vol. 186, № 2–4. – P. 311-338.
8. *Martello S., Toth P.* Knapsack problems: algorithms and computer implementations. – Chichester [etc.]: John Wiley & Sons Ltd., 1990. – 318 p.
9. GitHub: EA-based solver for 1.5D MSSCSP [Electronic resource]. – 2013. – [Cited 2013, 1 June]. – Available from: <https://github.com/akavrt/csp>.
10. *Mladenovic N., Hansen P.* Variable neighborhood search // *Computers & Operations Research.* – 1997. – Vol. 24, № 11. – P. 1097-1100.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Балабанов Виктор Николаевич – Донецкий национальный технический университет; e-mail: akavrt@gmail.com; Украина, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58; тел.: +380919242116; кафедра автоматизированных систем управления; аспирант.

Скобцов Юрий Александрович – e-mail: skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua; тел.: +380623010996; кафедра автоматизированных систем управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Balabanov Victor Nikolaevich – Donetsk National Technical University; e-mail: akavrt@gmail.com; 58, Artema street, Donetsk, 83001, Ukraine; phone: +380919242116; the department of automated control systems; postgraduate student.

Skobtsov Yuri Alexandrovich – e-mail: skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua; phone: +380623010996; the department of automated control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.896

Ю.В. Чернухин, Р.В. Сапрыкин, М.В. Лисичкин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

В настоящее время возрос интерес к адаптивным мобильным роботам. Сферы их применения весьма обширны и разнообразны: подводные и космические исследования, военная промышленность и спасательные операции, ремонтно-восстановительные работы в экстремальных условиях. В большинстве случаев они используются там, где присутствие человека либо невозможно, либо связано с опасностью для жизни и здоровья. Конечно, мобильные роботы использовались и ранее, но навигация в них, как правило, была реализована с помощью традиционных систем управления автоматного типа. Выход из строя одного из элементов такой системы зачастую приводит к выходу из строя всей системы, а увеличение живучести чаще всего достигалось за счёт дублирования элементов и подсистем. Построение системы управления бионического типа для адаптивного мобильного робота на основе нейронной сети, с использованием нейронов формально-логического типа, увеличивает живучесть нейросетевой системы управления и позволяет выполнять задачу навигации, даже тогда, когда значительная часть элементов управляющей системы выведена из строя.

Адаптивный мобильный робот; живучесть технических систем; нейросетевая система управления формально-логического типа.

Y.V. Chernukhin, R.V. Saprykin, M.V. Lisichkin

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DURABILITY ADAPTIVE MOBILE ROBOT WITH NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM

At the present time interest in adaptive mobile robot has grown. Their scope is very broad and diverse, underwater and space researches, military industry, rescue operations and repair work in extreme conditions. In most cases it used where the human presence is impossible or associated with danger to life and health. Of course, mobile robots have been used previously, but they navigate as a rule been realized through traditional automated control systems. The failure of one of the elements of this system often leads to failure of the entire system and its vitality was reached by doubling elements and subsystems. The construction of a bionic control system of adaptive mobile robot based on neural network with formal logical neurons can increase the survivability of neural network control system and carry out the task of navigation, even when much of the elements of the control system out of action.

Adaptive mobile robot; vitality of technical system; formally-logical type simulation neural network control system.

В настоящее время всё большее влияние на жизнь человечества оказывают адаптивные мобильные роботы (АМР). Сферы их применения весьма разнообразны и обширны: космос, оборона, автоматизированное производство, транспорт, домашнее хозяйство, подводные исследования, спасательные и ремонтно-восстановительные работы в экстремальных условиях и т.п. Присутствие человека во многих из них либо нежелательно, либо вообще невозможно.

На сегодняшний день АМР представляют собой технически сложные интеллектуальные системы. Естественно, очень важно, чтобы в процессе функционирования этих систем не происходило сбоев или отказов. К сожалению, любая система со временем выходит из строя и крайне важно знать, как скоро это произойдёт. Исходя из этого, вытекает следующий вопрос: «при каком количестве вышедшего из строя оборудования система перестанет выполнять поставленную перед ней задачу?». С этим вопросом неразрывно связано понятие живучести технических устройств.

Живучесть – это способность технического устройства, средства или системы выполнять основные функции, несмотря на полученные повреждения.

Естественно, выполнение каких-либо функций адаптивным мобильным роботом невозможно без систем технического зрения. Сенсорная подсистема позволяет роботу воспринимать информацию об окружающей среде, в нашем случае она представлена фасеточным глазом, в каждой ячейке которого расположен светочувствительный элемент, воспринимающий отражённый от определённой области пространства свет. Также рассматриваемый робот содержит нейронную сеть, на базе которой построена его бортовая система управления. В соответствии с бионическим методом адаптивного управления в каждый момент дискретного времени в её обязанности входит построение текущей модели окружающей среды, эмуляция на этой модели возможных траекторий достижения целевого объекта и принятие решений о направлениях перемещения АМР вдоль оптимальной из них [1]. Подсистема принятия решений, в данном случае, представляет собой однослойную нейросеть с обратными связями, выполняющую функции многостабильного триггера [1]. В каждый момент дискретного времени между фасетами и элементами нейронной сети, эмулирующей варианты поведения АМР, автоматически устанавливается взаимно-однозначное соответствие так, как это показано на рис. 1.

На данном рисунке показан адаптивный мобильный робот АМР, фасеты сенсорной подсистемы которого направлены на определенные участки внешней среды, имеющей свободные и запрещенные для движения участки, а также целевой участок. В связи с тем, что в данной работе предполагается оценивать только жи-

вучесть нейросетевых систем управления, предполагается, что внешняя среда максимально упрощена и представляет собой плоскость, на которой области черного цвета соответствуют запрещенным для движения участкам, области серого цвета соответствуют проходным участкам, а целевому участку соответствует область белого цвета.

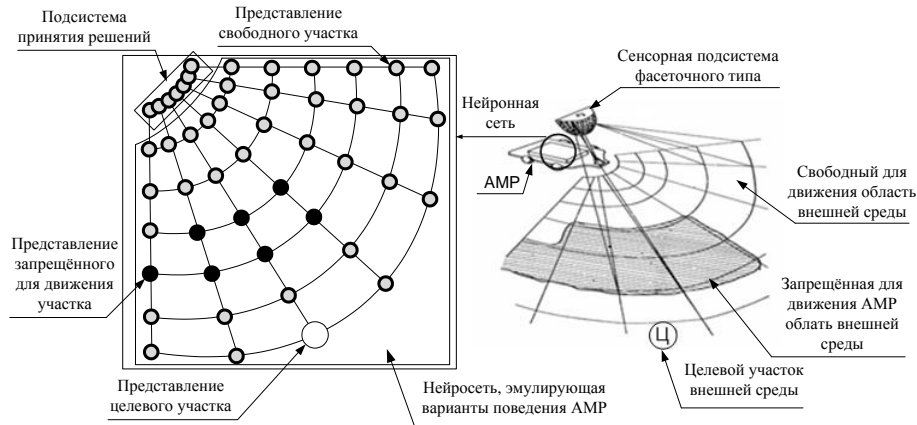


Рис. 1. Принцип установления взаимно однозначного соответствия между участками внешней среды и функциональным состоянием соответствующих им нейроэлементов нейронной сети

Естественно, выход из строя элементов сенсорной подсистемы или элементов нейронной сети приводит к ухудшению работы АМР. При этом неважно, поврежден ли сам зрительный элемент (фасета) или связанный с ним нейроэлемент (НЭ), или повреждена связь между ними. Учитывая данное обстоятельство, будем считать, что выходу из строя отдельной фасеты соответствует отказ всей цепочки: фасета, связь, нейроэлемент (Ф-С-НЭ). Поэтому возникает задача определения количества поврежденных цепочек Ф-С-НЭ нейросетевой системы управления, при которых выполнение задачи адаптивным мобильным роботом становится невозможным.

В данной работе эта задача решается экспериментально, на программной модели, эмулирующей поведение АМР, при различных повреждениях его нейросетевой системы управления. В качестве системы моделирования используется программная среда, построенная и разработанная в лаборатории искусственного интеллекта кафедры вычислительной техники ЮФУ, среды моделирования интеллектуальных роботов NAME [2].

Данная среда моделирования предоставляет собой набор компонент, классов, подсистем и готовых решений, позволяющих быстро создавать специализированные системы моделирования для конкретных задач. Благодаря большому количеству реализованных модулей, система позволяет моделировать поведение интеллектуальных мобильных роботов, функционирующих в различных естественных средах: надводной, подводной, воздушной и наземной [3].

В среде NAME реализованы модели различных роботов, а также предусмотрен механизм расширения её возможностей, который позволяет самостоятельно создавать новые модели роботов и реализовывать присущие только им свойства [2]. При этом программисту нет необходимости воспроизводить полный цикл функционирования АМР и такие его фрагменты, как: движение, восприятие информации о внешней среде и т.п. Кроме того, эта среда позволяет использовать

несколько типов моделей сенсорных подсистем (камера, лазерный дальномер, ультразвуковой сонар, гидроакустический сонар и т.д.). Дополнительные виды моделей сенсорных подсистем также можно реализовать самостоятельно.

В процессе исследований возникали задачи организации взаимодействия среды NAME с различными аппаратными робототехническими комплектами, а также с аппаратным акселератором нейровычислений. Решение данных задач позволило расширить инструментарий моделирующей среды NAME путём введения дополнительных модулей. В частности, для решения задачи исследования живучести АМР с нейросетевой системой управления и фасеточным сенсором структурная схема среды NAME была доработана следующим образом (рис. 2).

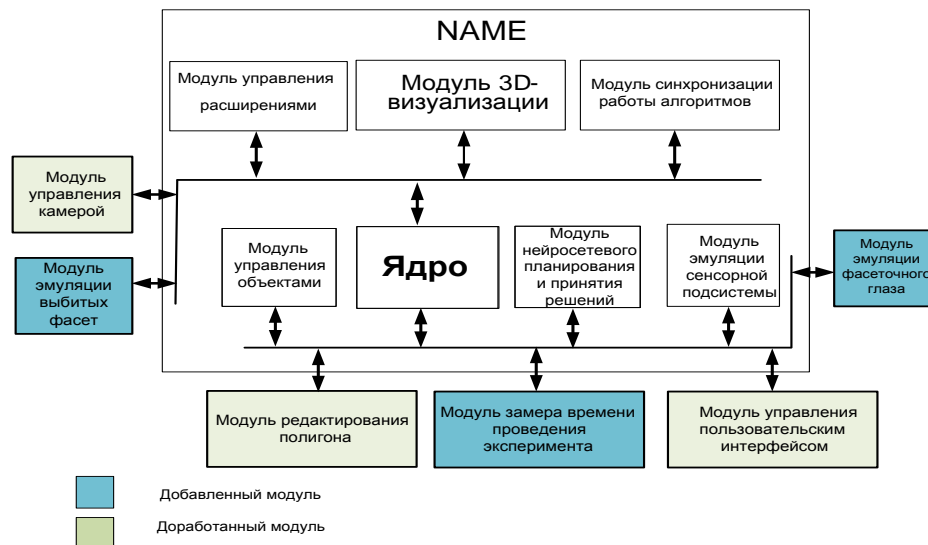


Рис. 2. Структура доработанной среды моделирования NAME, используемой для исследования живучести нейросетевых систем управления АМР

Как следует из рис. 2, доработанная среда моделирования, построенная на базе NAME, содержит:

1. Ядро, которое отвечает за синхронизацию работы всех модулей модулирующей среды.
2. Модуль синхронизации работы алгоритмов, обеспечивающий переключение между различными алгоритмами адаптивного поведения.
3. Модуль эмуляции сенсорной подсистемы, обеспечивающий эмуляцию бортовых сенсоров АМР для восприятия роботом информации о внешней среде.
4. Модуль нейросетевого планирования и принятия решений, который программно реализует бионический метод нейросетевого адаптивного управления [1] на базе нейропроцессорных сетей [4, 5], что позволяет решать задачу автоматической генерации траектории движения АМР к целевому объекту в среде со стационарными и динамическими препятствиями.
5. Модуль управления пользовательским интерфейсом, обеспечивающий широкие возможности по гибкому управлению процессом моделирования, который позволяет добавлять, удалять объекты, запускать и останавливать процесс моделирования и т.д..

6. Модуль управления расширениями, предназначенный для обеспечения возможности добавления в систему дополнительных модулей и управления их работой.
7. Модуль управления камерой, который обеспечивает возможность изменения положения виртуальной камеры в пространстве для удобного наблюдения за ходом проводимых экспериментов.

В результате была синтезирована моделирующая среда с удобным пользовательским интерфейсом (рис. 3), пригодная для организации экспериментальных исследований нейросетевых систем управления АМР.

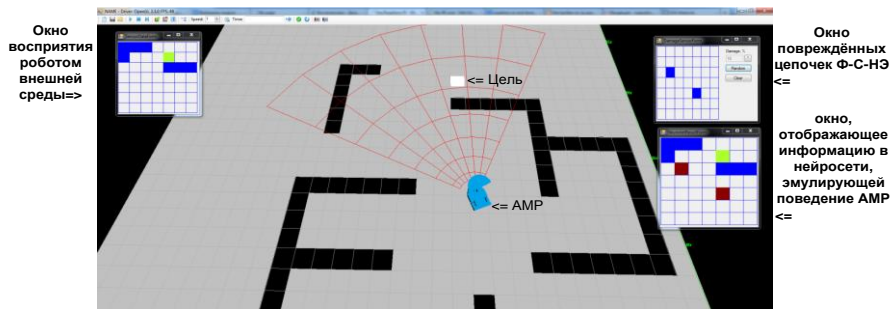


Рис. 3. Основное окно доработанной среды NAME

На рис. 3 сверху расположен набор инструментов для управления процессами моделирования. Программная модель адаптивного мобильного робота АМР может перемещаться по полигону, на котором расположены препятствия (области чёрного цвета) и цель (область белого цвета). Радиально расходящиеся от него линии показывают проекцию каждой фасеты на плоскость в области восприятия фасеточного сенсора. В окне слева отображается воспринятое роботом состояние внешней среды (светлым показана цель, тёмным – препятствия), а справа от него сверху расположено окно повреждённых цепочек Ф-С-НЭ. Перед началом проведения экспериментов пользователь задаёт эти цепочки самостоятельно, путём отключения соответствующих фасет. В нижнем правом углу расположено результирующее окно, содержащее информацию, отображаемую в нейросеть, эмулирующую варианты поведения АМР.

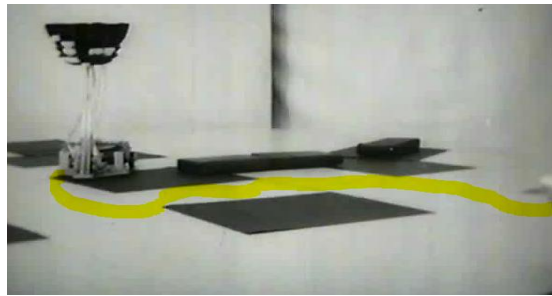
Суть экспериментов состоит в следующем. Перед АМР на полигоне расположены препятствия и целевая область. Задача робота состоит в том, чтобы достичь этой области, объезжая препятствия, используя оставшееся после задания отказавших фасет (цепочек Ф-С-НЭ) оборудования нейросетевой системы управления. Живучесть нейросетевой системы управления АМР определяется путем измерения времени решения им этой задачи на программной модели. Причем при уменьшении количества работоспособного оборудования до критической величины время прохождения роботом полигона увеличивается до бесконечности, так как решение становится невозможным.

По результатам исследований строится график функциональной зависимости времени преодоления роботом полигона от количества, выведенного из строя оборудования. Также строится график характеризующий качество преодоления роботом полигона на основе экспертной оценки оптимальности принимаемых нейросетевой системой управления решений.

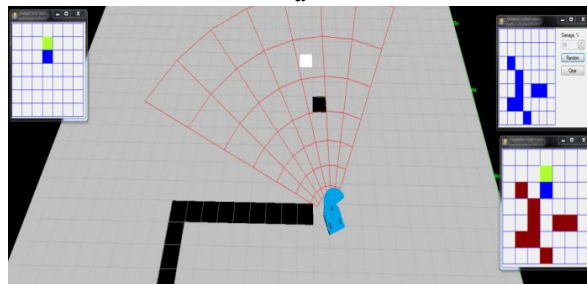
Ход проведения экспериментов выглядит следующим образом. Первый проход робот делает при 100 %-нтовой работе работающего оборудования. Время достижения цели АМР на таком наборе будет минимальным, а качество прохождения

оптимальным (отличным). С постепенным увеличением количества выведенных из строя цепочек Ф-С-НЭ, наблюдается увеличение времени прохождения полигона и ухудшение качества выполнения поставленной задачи. Затем наступает такой момент, когда выполнение поставленного задания становится невозможным.

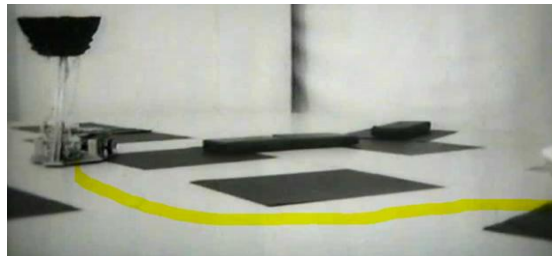
В одном из экспериментов на модели АМР были закрыты фасеты и задан полигон, соответствующие условиям аппаратно реализованного АМР [4]. В результате были получены данные подтверждающие адекватность программной модели аппаратному АМР (рис. 4).



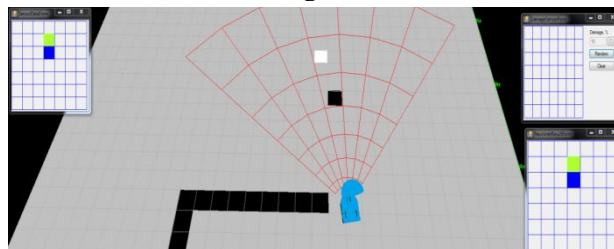
а



б



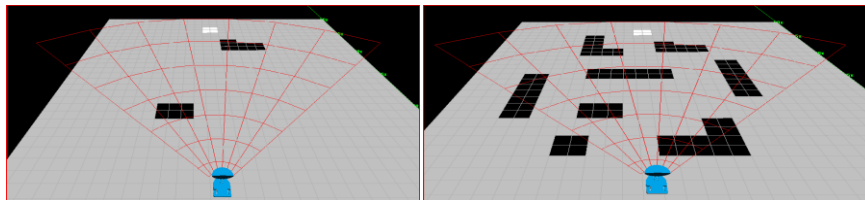
в



г

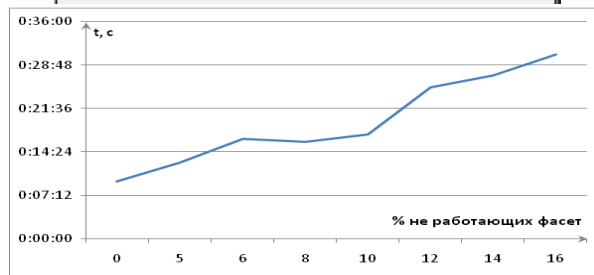
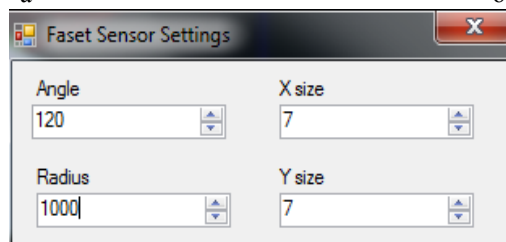
Рис. 4. Данные подтверждающие адекватность программной модели аппаратному АМР: а – аппаратный АМР с закрытыми фасетами; б – модель АМР с эмуляцией выхода из строя фасет; в – аппаратный АМР со 100 % рабочего оборудования; г – модель АМР со 100 % рабочего оборудования

Установление адекватности модели позволило провести ряд экспериментов на различных полигонах (рис. 5,а,б) и различными параметрами фасеточного глаза (рис. 5 в,г). В ходе экспериментов изменялся угол обзора фасеточного глаза, радиус обзора, его размерность, а также задавались различные полигоны и различные конфигурации повреждённых цепочек Ф-С-НЭ.

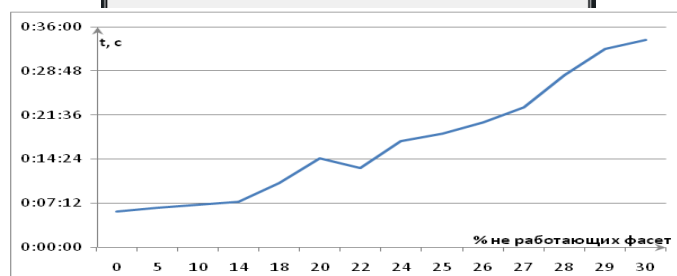
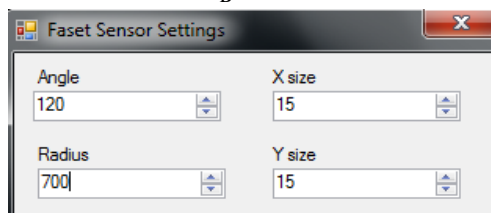


а

б



в



г

Рис. 5. Результаты экспериментов: а – простой полигон; б – сложный полигон; в,г – параметры фасеточного глаза и график времени преодоления роботом полигона в зависимости от количества выведенных из строя цепочек Ф-С-НЭ

Исходя из графиков времени преодоления роботом полигона, в зависимости от количества выведенных из строя цепочек Ф-С-НЭ, экспертных наблюдений и оценок был синтезирован график отображающий качество выполнения поставленной задачи нейросетевой системой управления АМР, в зависимости от процента повреждённого оборудования (рис. 6).

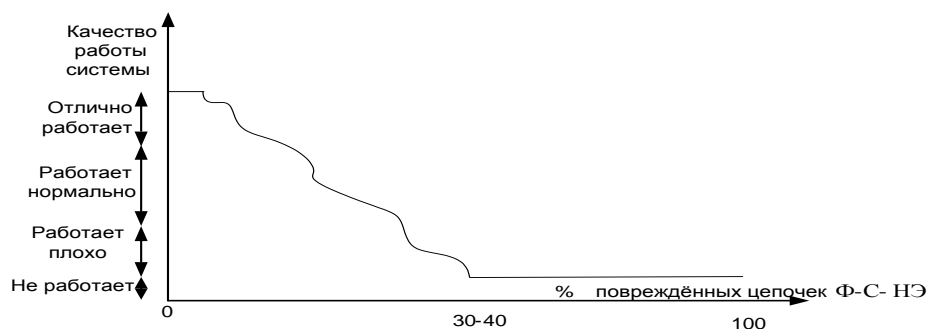


Рис. 6. Качество выполнения поставленной задачи роботом в зависимости от процента повреждённых цепочек Ф-С-НЭ

Таким образом, результаты проведенных экспериментов с различными параметрами фасеточного глаза и на различных полигонах позволили сделать следующие выводы:

1. Живучесть исследуемой нейросетевой системы управления довольно велика. Система отлично функционирует, пока количество выведенных из строя цепочек Ф-С-НЭ не превышает 10–20 % в зависимости от сложности полигона и размерности фасеточного глаза. При увеличении числа повреждённых цепочек Ф-С-НЭ система продолжает функционировать, но качество работы ухудшается. Потом наступает такой момент, когда система больше не может выполнять поставленную перед ней задачу. Это происходит при 30–40 % выведенного из строя оборудования.

2. Качество работы нейросетевой системы управления зависит от:

- ◆ процента выведенного из строя оборудования;
- ◆ количества исходного оборудования, чем больше размерность нейросети, тем выше эффективность и живучесть системы;
- ◆ схемы распределения повреждённых цепочек Ф-С-НЭ;
- ◆ сложности полигона, на котором проводятся испытания.

3. Данная модель может быть использована для программного исследования живучести проектируемых АМР с нейросетевой системой управления. Возможность изменения параметров фасеточного глаза и размера нейронной сети позволяет разработчику найти оптимальную конфигурацию для построения аппаратных реализаций нейросетевых систем управления АМР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернухин Ю.В. Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры: Монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – 273 с.
2. Чернухин Ю.В., Сапрыкин Р.В. Система виртуального моделирования поведения интеллектуальных агентов при исследовании ими естественной среды функционирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 11 (88). – С. 19-24.
3. Чернухин Ю.В., Писаренко С.Н., Приемко А.А. Нейросетевая система навигационной безопасности транспортных объектов в наземной, подводной, надводной и воздушной средах // Искусственный интеллект. Научно-теоретический журнал НАН Украины. – 2006. – № 3. – С. 331-339.

4. *Чернухин Ю.В.* Микропроцессорное и нейрокомпьютерное управление адаптивными мобильными роботами: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1993. – 91 с.
5. *Чернухин Ю.В.* Нейропроцессорные сети: Монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 439 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Чернухин Юрий Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: uvche@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; профессор.

Сапрыкин Роман Владимирович – e-mail: rsaprykin@gmail.com; кафедра вычислительной техники; ведущий инженер.

Лисичкин Максим Владимирович – e-mail: mvlisichkin@gmail.com; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Chernukhin Yuri Victorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: uvche@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer science; professor.

Saprykin Roman Vladimirovich – e-mail: rsaprykin@gmail.com; the department of computer science; engineer.

Lisichkin Maxim Vladimirovich – e-mail: mvlisichkin@gmail.com; the department of computer science; postgraduate student.

УДК 620.92:681.5

Е.Ю. Косенко, А.Я. Номерчук, И.О. Шаповалов

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Задача управления такими энергосистемами, для которых характерна значительная территориальная распределенность и неоднородность, имеет большую актуальность в настоящее время. Неоднородность системы может быть связана с использованием альтернативных источников электроэнергии типа ветровых и солнечных электростанций. Предложено реализовывать управление такими энергосистемами на базе концепции Smart Grids. При этом управление должно быть распределенным, т.е. оптимизация работы сети должна производиться несколькими локальными интеллектуальными устройствами. Представлена формальная математическая модель энергосистемы с территориально распределенными источниками и потребителями различных типов. Поставлена формальная задача управления на основе оптимизации целевой функции. Введены аналитические выражения для определения затрат, связанных с экологическим воздействием на окружающую среду, потреблением и распространением энергии. Предложено и обосновано применение многоагентных систем для управления рассматриваемыми энергосистемами. Описана структура, основные особенности предлагаемой многоагентной системы и правила взаимодействия агентов энергосистемы. Приведенная структура отличается простотой благодаря введенной классификации интеллектуальных агентов.

Энергосистема; территориальная распределенность; неоднородность; Smart Grids; модель; многоагентная система; оптимизация; целевая функция.