

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-40

Мин Хейн

АДАПТИВНАЯ, С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Объектом исследования являются адаптивные системы управления судовыми электроприводами. Цель исследования – разработка на основе концепции самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией, предложенной академиком А. А. Красовским, адаптивной, с высоким уровнем искусственного интеллекта, системы управления судовым электроприводом. Приведены особенности адаптивной системы управления с самоорганизующимся оптимальным регулятором с экстраполяцией, ее структурные схемы, алгоритмическое обеспечение и результаты синтеза системы самоорганизующегося управления конкретного судового электропривода. Рассмотрены режимы работы самоорганизующейся системы при наличии как параметрических, так и структурных возмущений. С помощью имитационного моделирования установлено, что разработанные алгоритмы обеспечивают не только параметрическую, но и структурно-параметрическую адаптацию системы, в отличие от систем с традиционными алгоритмами управления. Результаты исследования позволяют сделать вывод об эффективности разработанной адаптивной самоорганизующейся системы управления и перспективности предложенного подхода.

Ключевые слова: адаптивная система управления, самоорганизующийся регулятор, судовой электропривод.

Состояние проблемы

Разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем электропривода является приоритетным направлением развития современной техники. Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств, значительные успехи силовой электроники сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления (СУ) приводами на системы прямого цифрового управления. Судовые электроприводы как объекты управления относятся к классу сложных нестационарных объектов с нелинейными характеристиками различного вида, т. к. во время эксплуатации практически все элементы привода подвергаются внешним возмущающим воздействиям [1]. Следует учесть, что диапазоны изменения ряда параметров достигают больших значений. Для таких объектов СУ с постоянной настройкой малоэффективны, поэтому применяют адаптивные СУ, в большинстве своем основанные на использовании математических моделей (ММ) и реализующие принципы только параметрической адаптации. Разработка ММ сложных объектов требуемого уровня адекватности, их идентификация и сертификация (верификация) связаны с очень высокими интеллектуальными и материальными затратами. Поэтому традиционные направления в адаптивном управлении не могут решить эту проблему, когда даже структура ММ априори неизвестна. По характеру изменений в управляющем устройстве адаптивные системы делятся, как известно, на две большие группы: самонастраивающиеся и самоорганизующиеся. В 1980 г. была опубликована книга Дж. Саридиса «Самоорганизующиеся стохастические системы управления» [2]. Он предложил вместо термина «адаптивные системы» применять более широкий, но более конкретный термин «самоорганизующиеся системы с параметрической или функциональной адаптацией», причем

второй подкласс самоорганизующихся систем – «системами с высоким уровнем искусственного интеллекта». Проблема адаптивных СУ до настоящего времени относится к числу фундаментальных проблем, не получивших пока исчерпывающего решения, несмотря на полувековую историю развития и огромное число публикаций. В современных условиях актуальность создания высокосовременных адаптивных, приспособляющихся к условиям эксплуатации, СУ сложными непрерывными процессами не только не уменьшается, но и возрастает. В связи с этим весьма перспективным представляется подход к построению адаптивных СУ на основе принципов самоорганизации, предложенный в 1994 г. академиком РАН А. А. Красовским [3]. Этот подход основан на концепции разработки и применения самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ). Адаптивные системы с этим регулятором получили название самоорганизующихся СУ с высоким уровнем искусственного интеллекта (по терминологии Дж. Саридиса) [4]. Строгой теории автоматических контуров с СОРЭ пока не существует. Вся идеология СОРЭ наиболее подробно и системно была представлена в трудах А. А. Красовского [5]. Мы приводим результаты нашей разработки конкретных адаптивных СУ судовыми электроприводами на основе принципов самоорганизации, предложенных А. А. Красовским.

Цель, задачи и методы исследования

Целью исследования является разработка на основе концепции СОРЭ адаптивной, с высоким уровнем искусственного интеллекта, СУ судовым электроприводом.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей и принципа действия адаптивных систем общего назначения с СОРЭ;
- разработать общую методику синтеза самоорганизующейся СУ судовым электроприводом на основе концепции СОРЭ, реализующей структурно-параметрическую адаптацию;
- разработать СУ с самоорганизующимися алгоритмами для конкретных электроприводов;
- выполнить сравнительный анализ функционирования традиционной и самоорганизующейся СУ при параметрических и структурных возмущениях.

В ходе исследования использовались принципы системного подхода, в частности, методы, основанные на использовании результатов классической и современной теории управления, методы и алгоритмы оценивания и идентификации динамических систем, методы и алгоритмы оптимального и адаптивного управления, методы имитационного моделирования. Проверка эффективности полученных в ходе работы теоретических результатов осуществлялась средствами компьютерного моделирования в среде MATLAB.

Самоорганизующийся оптимальный регулятор с экстраполяцией имеет ряд принципиальных особенностей, которые необходимо учитывать при разработке СУ [6–8]. В основе СОРЭ используется структурная схема универсальной системы автоматического управления (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема универсальной системы автоматического управления

Принятые обозначения: X – внутренние переменные состояния объекта управления; Z – контролируемые переменные состояния объекта управления; U – управление; индексы о, ш, а, м – соответственно «оптимальное управление», «оптимальное управление в штатном режиме», «оптимальное управление в аварийном режиме», «переменные модели».

Представленная схема отличается от схемы традиционной СУ, содержащей только измерительные устройства (датчики) и блок с алгоритмами управления, наличием дополнительных блоков с алгоритмами оптимального оценивания и идентификации. Оптимальное управление возможно лишь при оптимальной обработке информации. Эти функции – оптимальное оценивание состояния и идентификация варианта [4] – представлены на рис. 2.

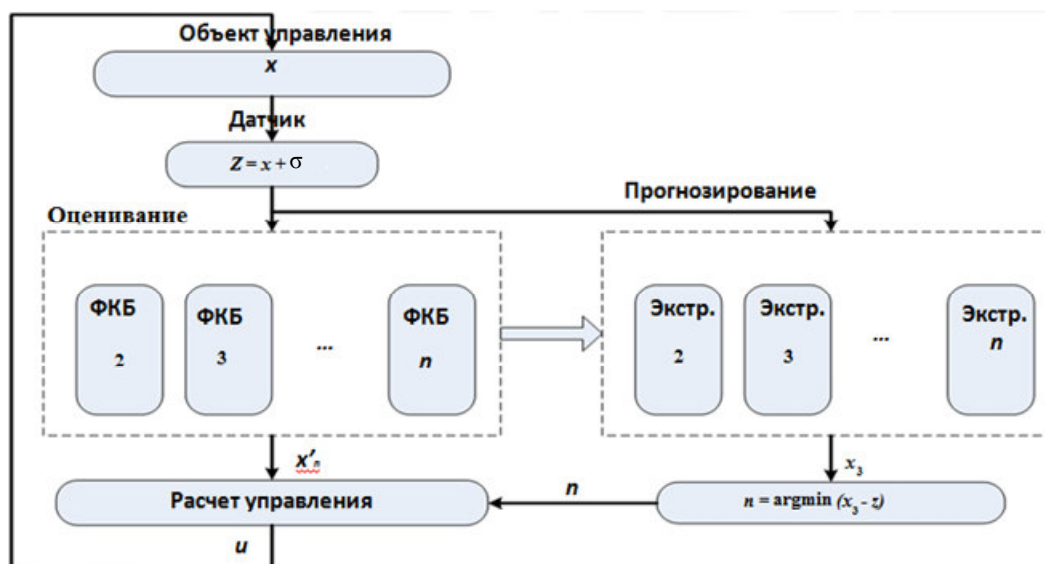


Рис. 2. Структурная схема самоорганизующегося регулятора с высоким уровнем искусственного интеллекта

На рис. 2 обозначены: ФКБ – блок фильтров Калмана – Бьюси; Экстр. – блок экстраполяции; $n = \text{argmin}(x, -z)$ – блок определения порядка модели; x – координаты объекта управления; z – сигнал с датчика; u – сигнал управления.

Учитывая особенности нестационарных нелинейных объектов, связанные с трудностями разработки их ММ, мы использовали в работе подход с так называемым «безмодельным управлением». При этом подходе нет необходимости в знании ММ объекта управления ни на стадии проектирования СУ, ни при ее эксплуатации. Сигнал рассогласования поступает на вход нескольких параллельно работающих циклических фильтров Калмана – Бьюси (ФКБ). Они различаются порядком и синтезированы для полиномиальных приближений сигнала рассогласования. На основе сравнения результатов работы ФКБ и сигнала рассогласования осуществляется выбор порядка полиномиальной модели объекта управления. Переменные состояния выбранного ФКБ используются для формирования оптимального по квадратичному критерию управления. Порядок выбранного ФКБ изменяется с течением времени, за счет этого и происходит адаптация регулятора. Далее, при известном порядке полиномиальной модели на следующем цикле можно найти оптимальное управление. В этом и заключается адаптация и оптимизация сигнала управления и самого регулятора. Существуют ММ алгоритмов регулятора как с непрерывным временем функционирования, так и с дискретным. В нашей работе применялись дискретные алгоритмы, т. к. они более удобны для реализации в микропроцессорной технике. Организация их работы следующая.

Непрерывное время разбивается на циклы, самым коротким интервалом времени является шаг. Входной величиной регулятора является сигнал рассогласования между задающим воздействием и выходной величиной регулируемого объекта. Сигнал рассогласования с помощью параллельно работающих алгоритмов оценивания на основе ФКБ обрабатывается на каждом шаге. В блоке оптимальной идентификации по выбранному показателю, измеряемому и вычисляемому

в ходе самого процесса регулирования, связанного с качеством, точностью регулирования на каждом цикле или на протяжении ряда циклов, осуществляется автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса. Исполнительная часть оптимального регулятора имеет алгоритм, синтезированный на основе интегрального квадратичного критерия. На выходе регулятора устанавливается экстраполятор нулевого порядка, обеспечивающий кусочно-постоянную экстраполяцию и обновление сигнала управления на каждом цикле. В течение цикла положение органа управления считается неизменным. Самоорганизация СУ, следовательно, осуществляется с помощью взаимосвязанных принятых алгоритмов оценки состояния системы, фильтрации входной информации, структурной и параметрической адаптации автоматически формируемой модели и, наконец, автоматически определяемых оптимальных управляющих воздействий. Именно по такому функционалу происходит вычисление управляющего воздействия в СОРЭ. Регулятор (рис. 2) назван самоорганизующимся, т. к. организация его структуры и определение оптимальных параметров, необходимых для достижения цели управления, происходят автоматически в соответствии со структурой, порядком и параметрами неопределенного объекта. Фактически СОРЭ представляет собой самоорганизующийся адаптивный алгоритм (СОА).

Результаты исследования

Синтез адаптивной СУ с высоким уровнем искусственного интеллекта осуществлялся применительно к электродвигателю постоянного тока как нестационарного объекта управления частотой вращения [9]. Из всех способов построения СУ такими двигателями, как известно, преимущественное распространение получили системы с подчиненным управлением, однако они имеют определенные ограничения, в первую очередь связанные с их стационарностью и линейными ММ. В ходе сравнительного анализа мы рассмотрели два варианта синтеза систем – с традиционным ПИ-регулятором на основе метода подчиненного управления в одноконтурной скоростной системе и самоорганизующимся регулятором при учете различных параметрических и структурных возмущений (рис. 3 и 4).

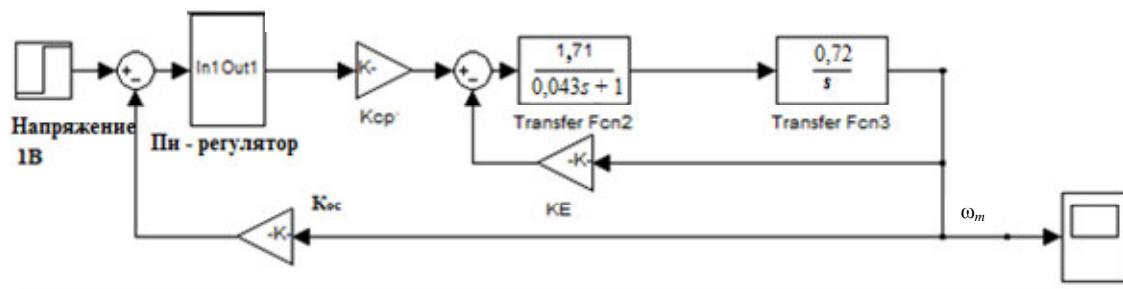


Рис. 3. Структурная схема системы управления с ПИ-регулятором

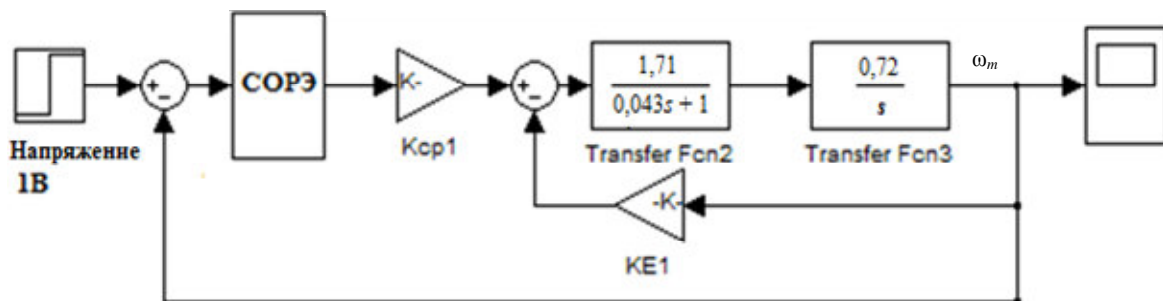


Рис. 4. Структурная схема системы управления с СОРЭ-регулятором

В качестве параметрических возмущений рассматривалось увеличение постоянной времени якоря двигателя $T_{я}$ от исходного значения $T_{яи}$ в 5, 10 и 20 раз ($5T_{яи}$, $10T_{яи}$, $20T_{яи}$ соответственно), а в качестве структурных возмущений – отсутствие обратной связи двигателя по

частоте вращения $\omega_{\text{KE1}} = 0$. На рис. 5, 6 представлены графики переходных процессов в системах для режимов с параметрическими и структурно-параметрическими возмущениями соответственно.

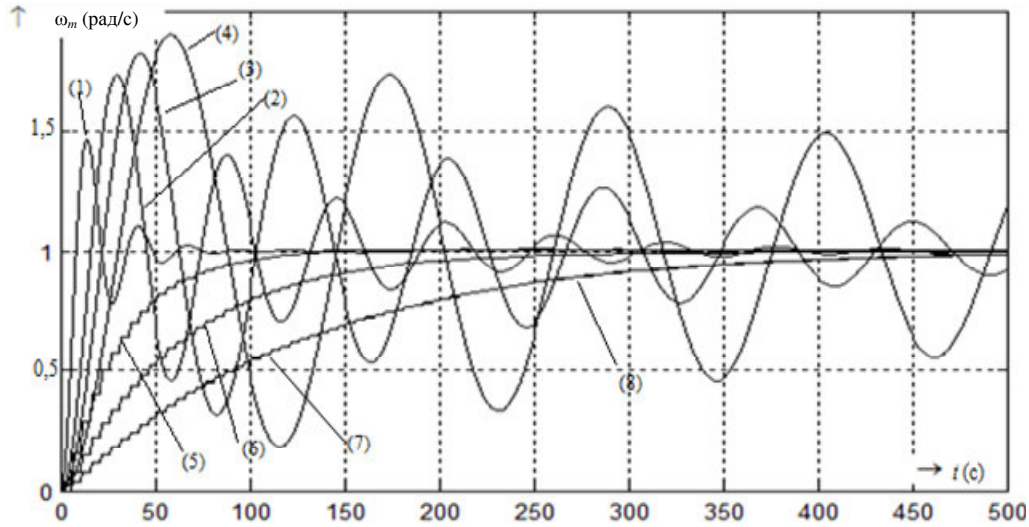


Рис. 5. Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при изменении постоянной времени якоря двигателя (параметрическая адаптация)

На рис. 5 обозначены: (1)–(4) – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором при $T_{\text{яи}}, 5T_{\text{яи}}, 10T_{\text{яи}}, 20T_{\text{яи}}$; (5)–(8) – кривые переходного процесса в системе с СОРЭ-регулятором при $T_{\text{яи}}, 5T_{\text{яи}}, 10T_{\text{яи}}, 20T_{\text{яи}}$.

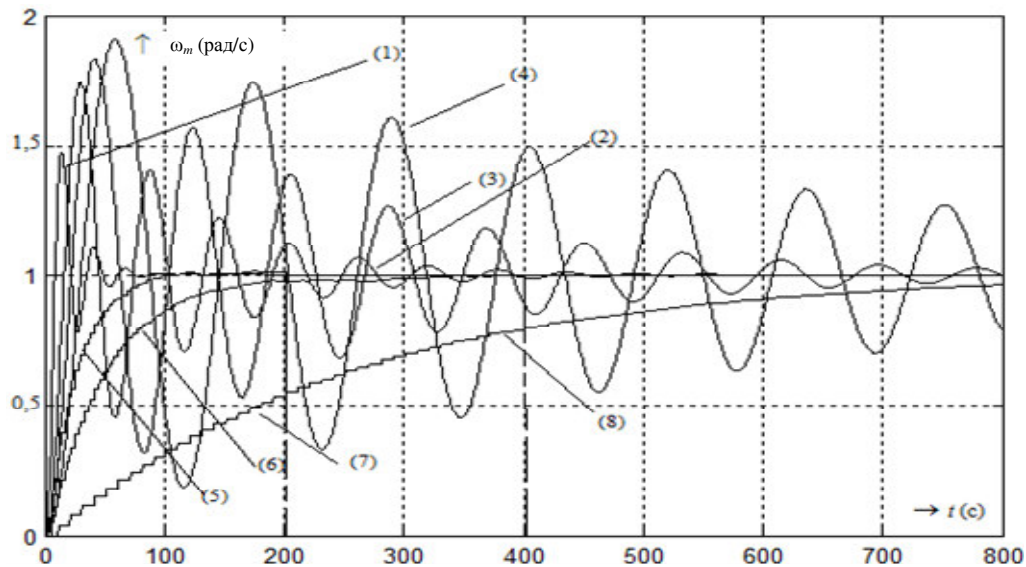


Рис. 6. Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени якоря двигателя (структурно-параметрическая адаптация)

На рис. 6 обозначены: (1)–(4) – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором при $T_{\text{яи}}, 5T_{\text{яи}}, 10T_{\text{яи}}, 20T_{\text{яи}}$ и отсутствии обратной связи; (5)–(8) – кривые переходного процесса с СОРЭ-регулятором при $T_{\text{яи}}, 5T_{\text{яи}}, 10T_{\text{яи}}, 20T_{\text{яи}}$ и отсутствии обратной связи.

Из данных рис. 5, 6 следует, что при наличии параметрических и структурных возмущений система с ПИ-регулятором становится неработоспособной, а система с СОРЭ – обеспечивает требуемые показатели качества регулирования.

Выводы

В результате исследований на основе концепции СОПЭ разработана адаптивная, с высоким уровнем искусственного интеллекта, СУ судовым электроприводом. Имитационное моделирование подтвердило высокую эффективность самоорганизующихся алгоритмов, с помощью которых обеспечивается структурно-параметрическая адаптация СУ. Принципиальное отличие алгоритмического обеспечения этих СУ от известных адаптивных систем состоит в том, что они построены на основе сочетания алгоритмов структурной (функциональной) адаптации с алгоритмами параметрической адаптации и оптимальным управлением. Результаты моделирования демонстрируют потенциальные возможности СУ судовыми электроприводами, построенных на основе принципов самоорганизации, что позволяет их считать автоматизированными электроприводами нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов В. В. Автоматическое управление электроприводами / В. В. Панкратов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 200 с.
2. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Дж. Саридис. М.: Наука, 1980. 400 с.
3. Красовский А. А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменными порядком наблюдателя и временем экстраполяции / А. А. Красовский // АиТ. 1994. № 11. С. 97–112.
4. Красовский А. А. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта / А. А. Красовский, А. И. Наумов // Изв. акад. наук. Теория и системы управления. 2001. №1. С. 69–75.
5. Красовский А. А. Избранные труды. Самые ранние. Самые новые / А. А. Красовский. М.: Наука, 2003. 614 с.
6. Туркин И. И. Самоорганизующиеся системы управления сложными техническими объектами / И. И. Туркин, Э. Б. Быков // Индустрия. 2005. № 1. С. 2–3.
7. Туркин И. И. Самоорганизующиеся системы управления сложными судовыми техническими средствами / И. И. Туркин // Морские интеллектуальные технологии. 2008. № 1. С. 66–68.
8. Туркин И. И. Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности адаптивной на принципах самоорганизации системы автоматического управления / И. И. Туркин, С. Н. Кирюхин // Материалы 23-й межвуз. науч.-техн. конф. «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы» (Петродворец, 13–14 марта 2012 г.). СПб: 2012. Ч. 3. С. 209–215.
9. Герман-Галкин С. Г. MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебное пособие для вузов / С. Г. Герман-Галкин. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 367с.

Статья поступила в редакцию 29.03.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мин Хейн – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; аспирант кафедры «Судовая автоматика и измерения»; hawgyi86@gmail.com; iiturkin@gmail.com.



Min Hein

ADAPTIVE, WITH HIGH LEVEL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE CONTROL SYSTEM OF THE SHIP ELECTRIC DRIVE

Abstract. Adaptive control systems of ship electric drives are objects of the research. The aim of the study is to develop a concept based on self-organizing optimum regulator with extrapolation, proposed by Academician A. A. Krasovskiy, adaptive high-level of artificial intelligence, ship electric drive control system. The features of the adaptive control system with self-organizing optimum regulator with extrapolation, its structural schemes, algorithmic support and the results of synthesis of the self-organizing system control of specific marine electric drive are given. The modes of the self-organizing system in the presence of both parametric and structural perturbations are considered. It is shown by means of simulation that the developed algorithms provide not only parametric, and structural-parametric adaptation of the system, unlike the systems with conventional control algorithms. The results of the research lead to the conclusion about the effectiveness of the developed adaptive self-organizing control systems and the prospects of the proposed approach.

Key words: adaptive control system, self-organizing regulator, ship electric drive.

REFERENCES

1. Pankratov V. V. *Avtomaticheskoe upravlenie elektroprivodami* [Automatic control of electric drives]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2013. 200 p.
2. Saridis Dzh. *Samoorganizuiushchiesia stokhasticheskie sistemy upravleniia* [Self-organizing stochastic systems of control]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 400 p.
3. Krasovskii A. A. Adaptivnyi optimal'nyi reguliator s peremennymi poriadkom nabliudatelia i vremenem ekstrapolitsii [Adaptive optimum regulator with alternative order of an observer and extrapolation time]. *AiT*, 1994, no. 11, pp. 97–112.
4. Krasovskii A. A., Naumov A. I. Analiticheskaiia teoriia samoorganizuiushchikhsia sistem upravleniia s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta [Analytical theory of self-organizing systems of control with high level of artificial intelligence]. *Izvestiia akademii nauk. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2001, no. 1, pp. 69–75.
5. Krasovskii A. A. *Izbrannye trudy. Samye rannie. Samye novye* [Selectas. The earliest. The newest.]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 614 p.
6. Turkin I. I., Bykov E. B. Samoorganizuiushchiesia sistemy upravleniia slozhnymi tekhnicheskimi ob"ektami [Self-organizing system of control of complex technical objects]. *Industriia*, 2005, no. 1, pp. 2–3.
7. Turkin I. I. Samoorganizuiushchiesia sistemy upravleniia slozhnymi sudovymi tekhnicheskimi sredstvami [Self-organizing system of control of complex technical objects]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2008, no. 1, pp. 66–68.
8. Turkin I. I. Kiriukhin S. N. Eksperimental'naia proverka rabotosposobnosti i effektivnosti adaptivnoi na print-sipakh samoorganizatsii sistemy avtomaticheskogo upravleniia [Experimental test of working capacity and effectiveness of adaptive based on the principles of self-organization system of automatic control]. *Materialy 23-i mezhdvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Voennaia radioelektronika: opyt ispol'zovaniia i problemy» (Petrod-vorets, 13–14 marta 2012 g.)*. SPb: 2012. Ch. 3. S. 209–215. Saint-Petersburg, 2012. Part 3. Pp. 209–215.
9. German-Galkin S. G. MATLAB & SIMULINK. *Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK: uchebnoe posobie dlia vuzov* [Designing the mechatronic systems on PC: textbook for higher educational institutions]. Saint-Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008. 367p.

The article submitted to the editors 29.03.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Min Hein – Russia, 190008, Saint-Petersburg; State Marine Technical University of Saint-Petersburg; Postgraduate Student of the Department "Ship Automation and Measurement"; hawgyi86@gmail.com; iiturkin@gmail.com.

