

*И. И. Туркин, Мин Хеин*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ПОДЧИНЁННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ**

Разработка способа совершенствования систем управления электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации имеет важное практическое значение. Рассмотрены особенности методов подчиненного регулирования многоконтурных систем управления электроприводами и синтеза адаптивных систем управления на основе концепции самоорганизующегося регулятора, предложенного академиком РАН А. А. Красовским. Разработана общая методика синтеза многоконтурных систем управления электроприводами нового типа на основе согласования принципов подчиненного регулирования и концепции самоорганизующегося регулятора, отличающаяся расширенным кругом решаемых задач (возможностью синтеза систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами) и повышенной эффективностью (снабжения этих систем адаптивными свойствами).

**Ключевые слова:** многоконтурная система управления, подчиненное регулирование, самоорганизующийся регулятор с экстраполяцией, электропривод.

### **Состояние проблемы**

Методы разработки систем управления объектами морской энергетики и электроэнергетики в значительной степени определяются особенностями протекающих в них физических процессов. Ярким примером является метод подчиненного регулирования синтеза многоконтурных систем автоматического управления электроприводами. Этот метод имеет большое значение для теории и практики электроприводов постоянного и переменного тока. Разработанный еще в 50-х гг. XX в. сотрудником фирмы «Siemens» С. Kessler [1], этот метод в том или ином виде до сих пор применяется в большинстве реальных систем управления электроприводами. Подтверждено реальным опытом, что наиболее эффективным и перспективным направлением развития электропривода является использование регулируемого электропривода и развитие систем автоматизации. Новый этап развития науки об управлении сложными объектами, к которым относятся электроприводы, будет проходить успешно при одновременном развитии алгоритмического и программного обеспечения, элементной базы, аппаратных средств, измерительных комплексов. Основные затраты при разработке систем управления современными электроприводами приходятся не на создание аппаратной части контроллера, а на разработку алгоритмического и программного обеспечения. В последние годы появились новые фундаментальные направления в теории и технике управления. К таким направлениям можно отнести физическую теорию управления, синергетический подход к проблемам управления, оптимизацию систем с прогнозируемой моделью, теорию самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией (СОРЭ), теорию нечетких и нейросетевых систем управления и др. Именно развитию и применению для совершенствования систем управления электроприводами одного из этих важнейших направлений – теории самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией, – наряду с классическим методом подчиненного регулирования, и уделено основное внимание в настоящей работе. Предложен новый метод построения многоконтурных адаптивных систем управления электроприводами на основе применения принципов подчиненного регулирования и самоорганизации, заключающийся в возможности их применения для электроприводов с нелинейными нестационарными характеристиками. Разработана общая методика синтеза указанных адаптивных систем управления электроприводами.

### **Цель и задачи исследования**

Совершенствование многоконтурных систем управления электроприводами путем совместного использования принципов подчиненного регулирования и самоорганизации – цель исследования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи:

1. Выявить особенности метода подчиненного регулирования, характерные для возможности применения самоорганизующихся алгоритмов.

2. Выполнить анализ метода построения адаптивных систем управления на основе принципов самоорганизации, предложенного в 1994 г. академиком РАН А. А. Красовским [2, 3].
3. Разработать общую методику синтеза многоконтурных систем управления электроприводами на основе согласования принципов подчиненного регулирования и концепции СОРЭ, реализующую структурно-параметрическую адаптацию.
4. Рассмотреть пример синтеза адаптивной системы управления электроприводом на основе разработанного подхода и выполнить сравнительный анализ функционирования традиционной и разработанной самоорганизующейся систем управления при параметрических и структурных возмущениях.

### Методы исследования

Исследование проблемы базировалось на принципах системного подхода, в частности, методах исследования, основанных на использовании результатов классической и современной теории управления, методах и алгоритмах оценивания и идентификации динамических систем, методах и алгоритмах оптимального и адаптивного управления, методах имитационного моделирования. Проверка эффективности полученных в ходе работы теоретических результатов осуществлялась средствами компьютерного моделирования в среде MATLAB.

Обратимся к методу подчиненного регулирования. Структурная схема многоконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рис. 1.

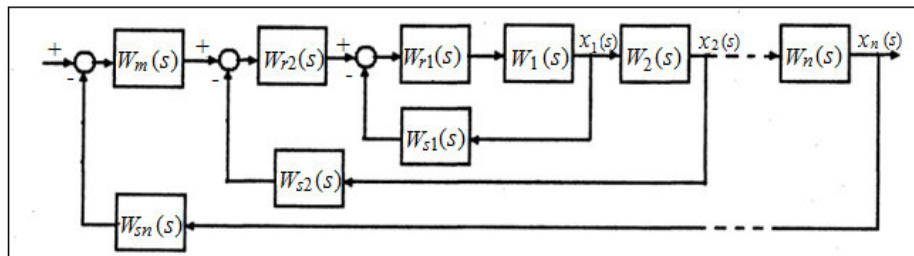


Рис. 1. Структурная схема многоконтурной системы подчиненного регулирования:  
 $W_n(s)$  – передаточная функция (ПФ)  $n$ -объекта;  $W_1(s)$  – ПФ 1-го объекта;  $W_2(s)$  – ПФ 2-го объекта;  
 $W_n(s)$  – ПФ  $n$ -го объекта;  $W_{r1}(s)$  – ПФ 1-го регулятора;  $W_2(s)$  – ПФ 2-го регулятора;  
 $W_{s1}(s)$  – ПФ 1-го датчика;  $W_{s2}(s)$  – ПФ 2-го датчика;  $W_{sn}(s)$  – ПФ  $n$ -го датчика

Структура многоконтурной системы, как известно, формируется по следующим правилам [1, 4]: объект регулирования разбивается на ряд динамических звеньев таким образом, чтобы выходными переменными всех звеньев были физические величины, представляющие интерес с позиций автоматического регулирования. Для каждого звена формируется свой регулятор.

Построение структурной схемы системы начинается с самого внутреннего контура, включающего в себя некомпенсируемую часть объекта и следующее за ним типовое звено компенсируемой части. Для выходной переменной первого компенсируемого звена строится замкнутый контур регулирования с последовательным корректирующим звеном – регулятором. Затем по порядку замыкаются контуры регулирования для выходных переменных всех последующих звеньев компенсируемой части объекта – каждый со своим регулятором, при этом обратные связи не перекрещиваются, а регуляторы соединяются последовательно так, что выходной сигнал регулятора каждого внешнего контура является задающим воздействием для внутреннего. Определение типа и расчет параметров регулятора в каждом из контуров осуществляется также последовательно, начиная с самого внутреннего, в соответствии со стандартными настройками. Для синтеза последовательных корректирующих звеньев в простейших линеаризованных контурах регулирования, где компенсируемая часть объекта управления представляет собой одно из перечисленных выше инерционных типовых звеньев, используются хорошо себя зарекомендовавшие на практике модели желаемой динамики, называемые «модульный» и «симметричный оптимум». Основной особенностью подчиненного регулирования является то, что каждый контур имеет помимо обратной связи еще и регулятор – получается комбинированная коррекция (последовательная (регулятор) и параллельная (обратная связь)), т. е. несколько одноконтурных систем регулирования и внутренние контуры подчиняются внешним (отсюда и название метода.)

Следовательно, метод подчиненного регулирования имеет определенные ограничения, связанные прежде всего с использованием линеаризованных моделей объектов, видом структурных схем и применяемой их декомпозицией, используемыми стандартными настройками. Вследствие этого современная практика нуждается не только в алгоритмах систем управления электроприводами с настройками на модульный (технический) и симметричный оптимумы, но и в адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации. Автоматизированные электроприводы с адаптивными свойствами позволяют существенно расширить диапазоны условий применения электроприводов и повысить их эффективность.

Из всех известных методов синтеза адаптивных оптимальных управлений наиболее эффективными в практическом применении к сложным нелинейным системам являются методы теории самоорганизующихся адаптивных регуляторов (АР) с экстраполяцией [2, 3]. Самоорганизующийся АР приспосабливается достаточно быстро к самым различным объектам, включая нестационарные и нелинейные. Для адаптивных регуляторов традиционных классов это недоступно. Главное отличие новых АР от традиционных заключается в том, что осуществляется оптимизация на коротком интервале времени (оптимизация на очередной малый цикл или несколько таких циклов). Такая оптимизация делает поведение объекта предсказуемым посредством универсального способа экстраполяции. Границы применимости нового класса АР еще не определены, но есть основание считать, что они широкие. Экстраполяция наиболее важных сигналов и оценивание производных позволит применять самоорганизующиеся наблюдатели для диагностики, реконфигурации, сигнализации, идентификации, а также поддержки принятия решений операторами.

В работе [5] предложен подход и методика синтеза адаптивной на принципах самоорганизации одноконтурной системы управления судовым электроприводом. Утверждается, что такая адаптивная система имеет возможность быстрой самоорганизации контуров управления в условиях аварийных нештатных ситуаций. Эта возможность и поддержка операторов при принятии решений и временная замена их контуром автоматического управления системы может играть очень важную роль в предотвращении аварий и катастроф. Используемые алгоритмы способствуют относительной простоте программного обеспечения системы и возможности его микропроцессорной реализации на промышленных контроллерах. Распространение на многоконтурные системы управления электроприводами с подчиненным регулированием этого подхода следует считать его развитием.

Таким образом, основной особенностью правила формирования структуры системы подчиненного регулирования, как указано, является то, что каждый контур имеет, помимо обратной связи, еще и конкретный регулятор. Учитывая это правило формирования структуры многоконтурной системы методом подчиненного регулирования и возможности СОПЭ, появляется возможность совместного использования принципов подчиненного регулирования и самоорганизации для синтеза многоконтурных систем управления с новыми адаптивными свойствами путем следующего правила формирования их структуры: регулятор последнего (внешнего) контура в системе подчиненного регулирования необходимо использовать только с самоорганизующимися алгоритмами, т. е. СОПЭ (при этом все предыдущие внутренние контуры образуют обобщенный объект). Внутренние контуры могут быть трех типов:

- *первый тип* – контуры с регуляторами и их стандартными и другими настройками, применяемыми для ограничения переменных и т. д.;
- *второй тип* – контуры с произвольными нелинейными, нестационарными элементами и структурой;
- *третий тип* – с отдельными контурами, как с регуляторами и их стандартными настройками, так и с произвольными нелинейными, нестационарными элементами и структурой.

В качестве примера рассмотрим применение этого правила для формирования структуры адаптивных многоконтурных систем управления электроприводами с внутренними контурами первого типа.

Структурная схема адаптивной двухконтурной скоростной системы электропривода постоянного тока, представленная на рис. 2, имеет два контура – с ПИ-регулятором ((PI-Cotroller) в первом (токовом) контуре и СОПЭ во внешнем втором (скоростном) контуре. ПИ-регулятор токового контура может настраиваться традиционными способами, применяемыми для систем с подчиненным регулированием. Настройка СОПЭ осуществляется с учетом требований к скоростному контуру.

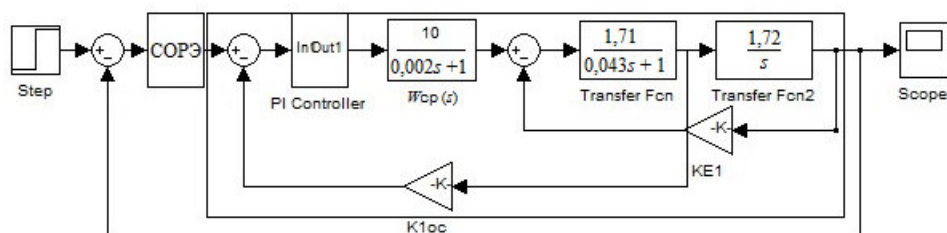


Рис. 2. Структурная схема адаптивной двухконтурной скоростной системы электропривода постоянного тока

Различают, как известно [1, 4], два основных вида систем управления положением исполнительных (рабочих) органов машин и механизмов – позиционные и следящие системы управления электроприводами. Спектр их назначения весьма широк. Позиционные электроприводы, в частности, применяются в металлообрабатывающих станках и роботах, следящие используются в системах наведения антенн и слежения за целью, в механизмах поворота рулей самолетов, ракет, морских судов и подводных лодок. Структурная схема адаптивной трехконтурной системы положения исполнительного органа, представленная на рис. 3, имеет три контура – с ПИ-регулятором (PI-Controller) в первом (токовом) контуре, с П-регулятором (с коэффициентом усиления  $K2p$ ) во втором (скоростном) контуре и СОПЭ во внешнем – третьем – контуре. ПИ-регулятор токового контура и П-регулятор скоростного контура могут настраиваться традиционными способами, применяемыми для систем с подчинённым регулированием. Настройка СОПЭ осуществляется с учетом требований к внешнему контуру положения исполнительного органа машины или механизма.

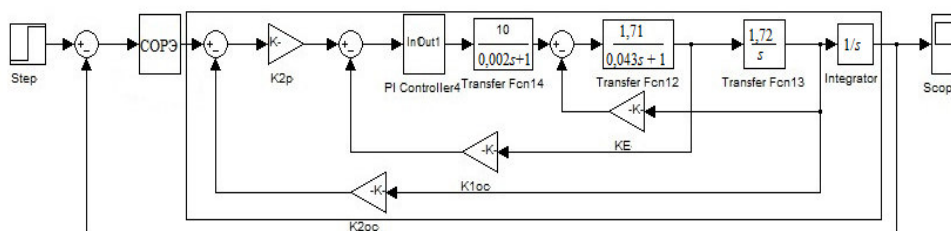


Рис. 3. Структурная схема адаптивной трехконтурной системы управления электропривода постоянного тока

Аналогичным образом формируются структурные схемы адаптивных многоконтурных систем управления электроприводами с внутренними контурами второго и третьего типа. Системы управления электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации приобретают отдельные свойства, характерные как для систем подчиненного регулирования и самоорганизующихся, так и новые. Применение предлагаемого подхода, в частности, приводит к возможности разработки систем управления одновременно с алгоритмами структурной и параметрической адаптации, а также с ограничениями на конкретные отдельные переменные [6–8].

### Результаты исследования

В качестве примера применения разработанного метода рассматривался синтез двухконтурной системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока. Сравнительный анализ выполнялся путем моделирования процессов в двух системах управления электроприводом:

- с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором в первом (токовом) и самоорганизующимся регулятором (СОПЭ) во втором (скоростном) контуре (см. рис. 2);
- с традиционным ПИ-регулятором в первом (токовом) контуре и пропорциональным (П) регулятором во втором (скоростном) контуре со стандартными настройками (рис. 4).

Отметим, что для ПИ-регуляторов токового контура в этих системах применена стандартная настройка.

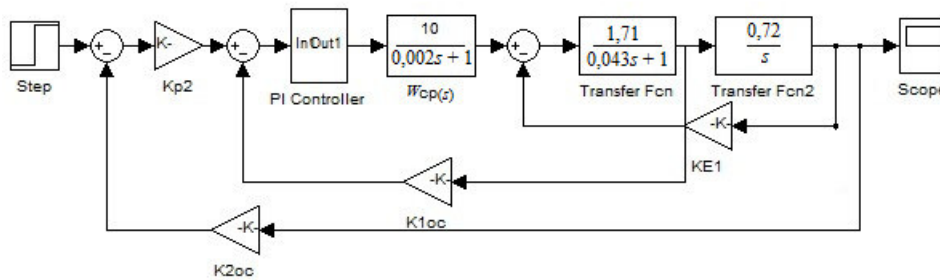


Рис. 4. Структурная схема двухконтурной системы управления скоростью электропривода с ПИ-регулятором в первом (токовом) контуре и П-регулятором во втором (скоростном) контуре

Для имитации нестационарности объекта управления (параметрического возмущения) предполагалось 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 структурного возмущения – наличие и отсутствие ( $KE = 0$ ) обратной связи двигателя по частоте вращения.

На рис. 5 представлены графики переходных процессов в системах для режимов с указанными параметрическими и структурно-параметрическими возмущениями соответственно.

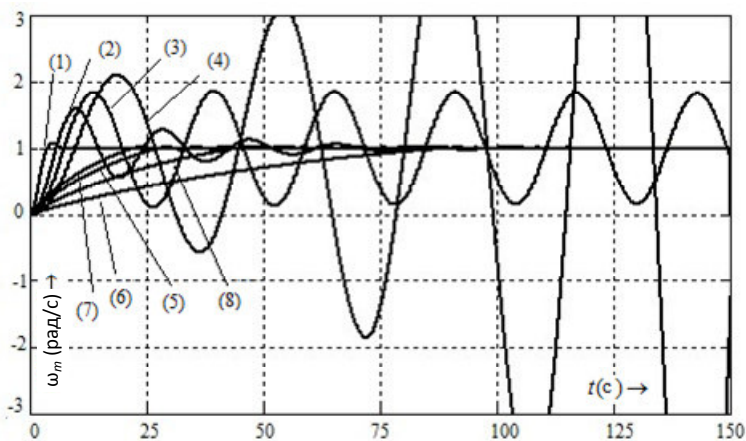


Рис. 5. Графики переходных процессов в системах управления с П-регулятором и СОПЭ-регулятором во втором контуре при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени якоря двигателя (структурно-параметрическая адаптация)

На рисунке обозначены: (1)–(4) – кривые переходного процесса в системе с П-регулятором во втором контуре (рис. 4) при  $T_{яи}$ ,  $5T_{яи}$ ,  $10T_{яи}$ ,  $20T_{яи}$  и отсутствии обратной связи; (5)–(8) – кривые переходного процесса с СОПЭ-регулятором (см. рис. 3) при  $T_{яи}$ ,  $5T_{яи}$ ,  $10T_{яи}$ ,  $20T_{яи}$  и отсутствии обратной связи. Из вида графиков следует, что при наличии параметрических и структурных возмущений система с ПИ-регулятором становится неработоспособной, а система с СОПЭ – обеспечивает высокое качество регулирования с монотонными переходными процессами и стандартной настройкой токового контура.

### Выводы

В результате исследований разработан метод совершенствования систем управления электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации. Рассмотрены особенности методов подчиненного регулирования многоконтурных систем управления электроприводами и синтеза адаптивных систем управления на основе концепции самоорганизующегося регулятора (СОПЭ), предложенного академиком РАН А. А. Красовским. Разра-

ботана общая методика синтеза многоконтурных систем управления нового типа на основе согласования принципов подчиненного регулирования и самоорганизации, отличающиеся расширенным кругом решаемых задач (возможностью синтеза систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами) и повышенной эффективностью (снабжения этих систем адаптивными свойствами).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов В. В. Автоматическое управление электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 200 с.
2. Красовский А. А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменными порядком наблюдателя и временем экстраполяции // АиТ. 1994. № 11. С. 97–112.
3. Красовский А. А. Избранные труды. Самые ранние. Самые новые. М.: Наука, 2003. 614 с.
4. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Екатеринбург: РГППУ, 2008. 279 с.
5. Мин Хейн. Адаптивная, с высоким уровнем искусственного интеллекта, система управления судовым электроприводом // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 2. С. 95–101.
6. Туркин И. И., Быков Э. Б. Самоорганизующиеся системы управления сложных технических объектов // Индустрия. 2005. № 1. С. 2–3.
7. Туркин И. И. Самоорганизующиеся системы управления сложными судовыми техническими средствами // Морские интеллектуальные технологии. 2008. № 1. С. 66–68.
8. Туркин И. И., Кирюхин С. Н. Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности адаптивной на принципах самоорганизации системы автоматического управления // 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.

Статья поступила в редакцию 08.07.2016

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Туркин Игорь Иванович** – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовой автоматики и измерений; iiturkin@gmail.com.

**Мин Хейн** – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; аспирант кафедры судовой автоматики и измерений; hawgyi86@gmail.com.



*I. I. Turkin, Min Hein*

#### IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF CONTROL OF ELECTRIC DRIVES BASED ON THE PRINCIPLES OF SUBORDINATED REGULATION AND SELF-ORGANIZATION

**Abstract.** The development of the approach to improving electrical drive control systems based on the principles of subordinated regulation and self-organization is of significant value. The features of the methods of subordinated regulation of multi-loop control systems of electric drives and synthesis of adaptive control systems based on the concept of self-organizing controller, proposed by Academician of RAS A. A. Krasovskiy, are considered. A general procedure for the synthesis of a new

type multi-loop control system based on the harmonization of the subordinated regulation and the concepts of the self-organizing controller, differing in the expanded range of tasks (the possibility of the synthesis of control systems of non-linear and non-stationary dynamic objects) and improved efficiency (supply of these systems with adaptive properties) is developed.

**Key words:** multi-loop control system, subordinated regulation, self-organizing controller with extrapolation, electric drive.

#### REFERENCES

1. Pankratov V. V. *Avtomatischeskoe upravlenie elektroprivodami* [Automatic control of electric drives]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2013. 200 p.
2. Krasovskii A. A. Adaptivnyi optimal'nyi regulator s peremennymi poriadkom nabliudatelia i vremenem ekstrapoliatsii [Adaptive optimum regulator with alternative order of an observer and extrapolation time]. *AiT*, 1994, no. 11, pp. 97–112.
3. Krasovskii A. A. *Izbrannye trudy. Samye rannye. Samye novye* [Selections. The earliest. The newest]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 614 p.
4. Shreiner R. T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniia elektroprivodov* [Systems of subordinated regulation of electric drives]. Ekaterinburg, Izd-vo RGPPU, 2008. 279 p.
5. Min Khein. Adaptivnaia, s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta, sistema upravleniia sudovym elektroprivodom [Adaptive system of control of marine electric drives with high level of artificial intellect]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 2, pp. 95–101.
6. Turkin I. I., Bykov E. B. Samoorganizuiushchiesia sistemy upravleniia slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Self-organizing systems 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 systems 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 printsipakh 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 mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Voennaia radioelektronika: opyt ispol'zovaniia i problemy» (Petrodvorets, 13–14 marta 2012 g.)*. Saint-Petersburg, 2012. Part 3. Pp. 209–215.

The article submitted to the editors 08.07.2016

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Turkin Igor Ivanovich** – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Automation and Measurements; iiturkin@gmail.com.

**Min Hein** – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Postgraduate Student of the Department of Ship Automation and Measurements; haw-gyi86@gmail.com.

