

УДК 621.311.24

*А.Л. Логинов, В.В. Потехин, Д.В. Акулов,  
А.К. Хритonenков, И.Г. Полетаев*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ**

*A.L. Loginov, V.V. Potekhin, D.V. Akulov,  
A.K. Khritonenkov, I.G. Poletaev*

### **INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS WIND FARM**

Обоснована проблема управления автономной ветроэлектростанцией. Описан способ решения этой проблемы при помощи комбинации Адаптивного Эвристического Критика, использующего модель обучения с подкреплением, и нечеткой логики. В среде Matlab/Simulink разработана математическая модель автономной ветроэлектростанции. Выполнено сравнение работы ветроэлектростанции без управления и с использованием интеллектуальной системы управления.

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ ГИБРИДНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА. АВТОНОМНАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.**

The problem of wind farm intelligent control is described, and given a way to solve the problem with using a combination of Adaptive Heuristic Critic model with Reinforcement Learning and Fuzzy Inference System. Autonomous wind farm is modelled in Matlab/Simulink. Wind farm work using intelligent control system is compared with wind farm work without control.

**INTEGRATED DISTRIBUTED HYBRID NETWORK. INTELLIGENT CONTROL SYSTEM. WIND TURBINE. AUTONOMOUS WIND FARM. NEURAL NETWORK SYSTEM.**

В современном мире развитие страны определяется состоянием ее энергетического комплекса. Традиционно в качестве основного источника энергии использовалось органическое топливо (нефть, газ, уголь). Однако ограниченность запасов органического топлива и неэкологичность его применения требуют развития альтернативных направлений энергетики. Всё активнее используются такие источники энергии, как ветроустановки, геотермальные генераторы, солнечные батареи и др. Количество энергии ветра на нашей планете в сто раз превосходит энергию всех рек, добытую гидроэлектростанциями.

Характеристика вырабатываемой энергии зависит от скорости ветра, а если быть точнее, от третьей степени скорости ветра [1]. На рис. 1 представлен график зависимости вырабатываемой мощности от частоты вращения ротора генератора при раз-

личной скорости ветра.

Появляется необходимость в интеллектуальных алгоритмах высокого уровня,

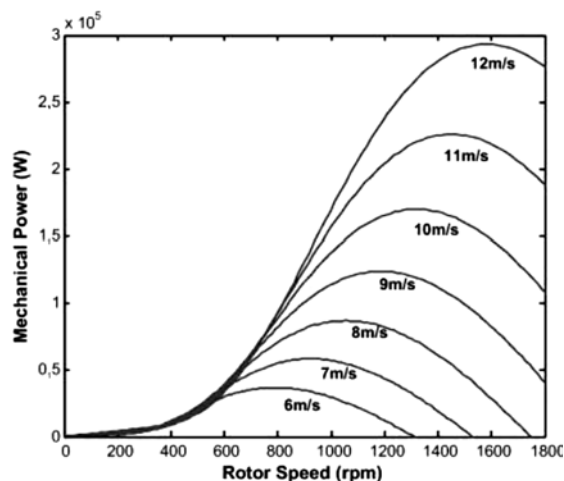


Рис. 1. Зависимость вырабатываемой мощности от частоты вращения ротора при различной скорости ветра

позволяющих обеспечить оптимальную частоту вращения ветроколеса при определенной скорости ветра. Используемые в подобных случаях принципы управления требуют принятия сложных оперативных решений на основе оценивания большого числа параметров в условиях недостаточной информации или ограниченных условий, т. к. направление и скорость потока ветра непостоянны и слабо предсказуемы [2].

Кроме того, требуется учитывать взаимовлияние ветроустановок, т. к. поместив одну турбину по направлению движения ветра за другой турбиной, мы получим уменьшение скорости ветряного потока после первой турбины, и как результат — уменьшение суммарной выработки электроэнергии [3–6].

В [7, 8] приведены примеры алгоритмов управления с использованием нечеткой логики. В [9–11] алгоритмы управления ВЭС основаны на нейросетевых методах.

В качестве способа управления системой ВЭС предложено использовать мультиагентный подход. Разработана мультиагентная система для организации взаимодействия составных частей ВЭС, сбора данных, передачи и обработки управляющих воздействий. Система управления ВЭС подобно физической системе ВЭС обладает иерархической структурой. В корне иерархии находится панель управления ВЭС, осуществляющая наблюдение и контроль над работой всей системы в целом. На следующих уровнях иерархии находятся узлы, отвечающие за работу отдельных элементов, таких, как группы ВЭУ, ниже находятся отдельные ВЭУ, а также модель потребления. На последнем уровне иерархии находятся частные потребители электроэнергии.

Мультиагентная система может быть представлена в виде ориентированного нагруженного графа, вершинами которого являются интеллектуальные агенты, а ребрами — каналы передачи сообщений и электроэнергии. Иерархия похожа на граф-дерево с тем лишь различием, что между непосредственными потомками одного и того же агента могут существовать дополнительные каналы передачи электроэнергии, используемые для балансировки объема по-

даваемой электроэнергии или как запасные каналы передачи энергии в случае выхода из строя главных каналов.

Такую систему можно считать альтернативным вариантом организации системы в виде группы брокеров. Каждый брокер взаимодействует с ограниченным локальным набором клиентов, а также взаимодействует с соседними брокерами, тем самым реализуя распределенный механизм обмена сообщениями между агентами. Важным свойством такого подхода является масштабируемость и отказоустойчивость.

Система может быть разделена на две основные части: орган центрального управления и агенты. Каждый из агентов взаимодействует с локальным программируемым логическим контроллером, либо получает данные с сенсоров. Основная функциональность агентов — это чтение данных сенсоров и трансляция управляющих воздействий, если это предусмотрено функциями агента. Взаимодействие агентов с центральным управляющим устройством и между собой производится через сеть обработки событий.

Механизм коммуникации между агентами и сетью обработки данных реализуется по принципу публикация-подписка.

Сеть обработки событий накладывает фильтры на события, транслируемые агентами. В результате на выходе из сети формируется несколько уровней иерархии событий. Начиная от низкоуровневых сообщений об ошибках, заканчивая сформированными на основе событий низкого уровня событиями, например событиями состояния отдельных компонент системы.

Структура интеллектуального агента во многом зависит от того, какие роли присвоены агенту во время разработки системы. Единственное оборудование, которое присутствует в каждом интеллектуальном агенте, — это управляющее оборудование, но также может присутствовать и дополнительное оборудование, например метеостанция. В текущем проекте управляющее оборудование моделируется в среде Matlab, но для физической реализации могут применяться промышленные программируемые логические

контроллеры (ПЛК).

В данной мультиагентной системе можно выделить следующие основные роли агентов:

- главное управляющее устройство;
- группа ВЭУ;
- отдельная ВЭУ;
- зарядное устройство;
- метеостанция;
- автономный потребитель;
- бойлер.

Все агенты имеют одинаковую базовую структуру и функциональность.

Каждый агент способен выполнять действия согласно информации, поступившей с верхних уровней иерархии. Однако агенты отличаются друг от друга действиями, которые для них доступны, в зависимости от занимаемой ими позиции в иерархии системы.

Для обеспечения среды взаимодействия между агентами, а также инструментов диагностики вводится понятие системы сбора событий. Большинство распределенных систем имеют встроенные системы диагностики. Такие системы используют логи, формируемые исполняющими модулями, для выявления производительности базовых операций, выполняемых системой. Операторы, работающие с такого рода системами, могут получить значительное количество информации уровня базовых операций, однако получение аналитических данных более высокого уровня остается проблематичным. Безусловно, существуют различные аналитические системы, позволяющие осуществлять подробные аналитические срезы постфактум, однако для системы ветроэлектростанции критически важным может быть быстрота реакции не только на базовых уровнях, но и на других уровнях абстракции. В результате на текущий момент в основном существуют развитые системы диагностики низкоуровневых проблем, а также верхнеуровневые аналитические системы.

В данном проекте также возникает потребность обработки событий, происходящих на различных уровнях иерархии. Основой предлагаемого подхода является сбор низкоуровневых событий из систем

диагностики, агрегация их и преобразование в события более высокого уровня.

В общем случае поток событий содержит значительные объемы информации. Отдельное событие не имеет значения, но события коррелируют между собой, их взаимосвязи должны учитываться. Шаблоны сообщений описывают взаимосвязи между событиями в облаке событий и имеют определенное значение в предметной области.

Система обработки событий содержит:

- источники событий – предоставляют атомарные события;

- обработчики событий – СЕР компоненты находят шаблоны событий;

- агенты обработки событий – компоненты, осуществляющие реакцию на определенные события.

Сеть обработки событий позволяет организовать мониторинг текущего состояния системы, выявить верхнеуровневые события и передать их соответствующим агентам.

Взаимодействие агентов определяется ситуационными и плановыми векторами.

Ситуационные векторы содержат полную информацию о текущем состоянии агента или группы агентов. Формат ситуационных векторов заранее определяется при дизайне системы и не может изменяться во время исполнения. При инициализации системы агенты формируют ситуационные вектора и постоянно поддерживают их в актуальном состоянии на протяжении всего времени работы мультиагентной системы. Существует три вида ситуационных векторов:

- локальный ситуационный вектор;
- групповой ситуационный вектор потенциальной группы;
- групповой ситуационный вектор родительской группы.

Локальный ситуационный вектор может иметь различные параметры в зависимости от уровня иерархии. Приведем общий набор параметров для локального вектора:

- уникальный идентификационный номер (ИН), присваиваемый агенту при дизайне системы;
- иерархический уровень агента;
- потребляемая активная мощность;
- скорость ветра;

направление ветра;  
 температура воздуха;  
 влажность воздуха;  
 скорость вращения ротора отдельной ВЭУ;  
 кпд отдельной ВЭУ;  
 мощность для отдельной ВЭУ;  
 частота ВЭУ для отдельной ВЭУ;  
 ток для отдельной ВЭУ;  
 уровень заряда АКБ;  
 статус запроса на заряд АКБ;  
 мощность АКБ;  
 частота АКБ;  
 ток АКБ;  
 температура воды в бойлере;  
 состояние отдельной ВЭУ;  
 состояние АКБ;  
 состояние коммуникационного LAN-оборудования.

Если локальный ситуационный вектор описывает состояние одного агента, то групповые векторы описывают состояния всех объектов в заданной группе. Формирование группового ситуационного вектора потомственной группы и группового ситуационного вектора родительской группы происходит по следующему алгоритму.

1. Главный агент системы начинает процесс формирования векторов потомственных и родительских групп.

2. Главный агент системы высылает запрос на предоставление локальных векторов всем членам своей родительской группы.

3. После получения локальных векторов главный агент формирует групповой ситуационный вектор своей родительской группы.

4. Групповой вектор родительской группы главного агента системы также является групповым вектором потомственной группы для всех непосредственных потомков главного агента.

5. Главный агент высылает всем своим прямым потомкам групповой вектор родительской группы, тем самым завершая формирование своих групповых векторов.

Остальные агенты системы при формировании групповых векторов работают по следующему алгоритму.

1. При получении запроса от агента-родителя на предоставление локального си-

туационного вектора агент обновляет свой ситуационный вектор и отправляет в ответ на запрос обновленный локальный вектор.

2. После получения группового вектора родительской группы агента-родителя агент формирует на его основе групповой вектор потомственной группы.

3. Агент высылает запрос на предоставление локальных векторов всем членам своей родительской группы.

4. После получения локальных векторов агент формирует групповой ситуационный вектор своей родительской группы.

Агент высылает всем своим прямым потомкам групповой вектор родительской группы, тем самым завершая формирование своих групповых векторов.

Важнейшую роль в процессе работы системы играют плановые векторы, посредством которых агент-родитель управляет своими потомками в родительской группе и, следовательно, системой в целом. Плановый вектор агента определяет планируемые параметры, т. е. параметры, которые агент-родитель хочет получить от своего агента-потомка, модифицируя его плановый вектор.

Плановые векторы на каждом уровне иерархии имеют различный формат. Приведем общий список параметров для планового вектора:

команда повышения скорости вращения ротора отдельной ВЭУ;

команда понижения скорости вращения ротора отдельной ВЭУ;

команда включения тэнов отдельного бойлера;

команда выключения тэнов отдельного бойлера;

команда остановки отдельной ВЭУ;

команда запуска отдельной ВЭУ;

команда принудительного заряда аккумулятора;

разрешение заряда аккумулятора.

На рис. 2 показана обобщенная схема иерархии системы.

Принципиально в структуре системы управления автономной ветроэлектростанцией можно выделить несколько сущностей:

центральное управляющее устройство;

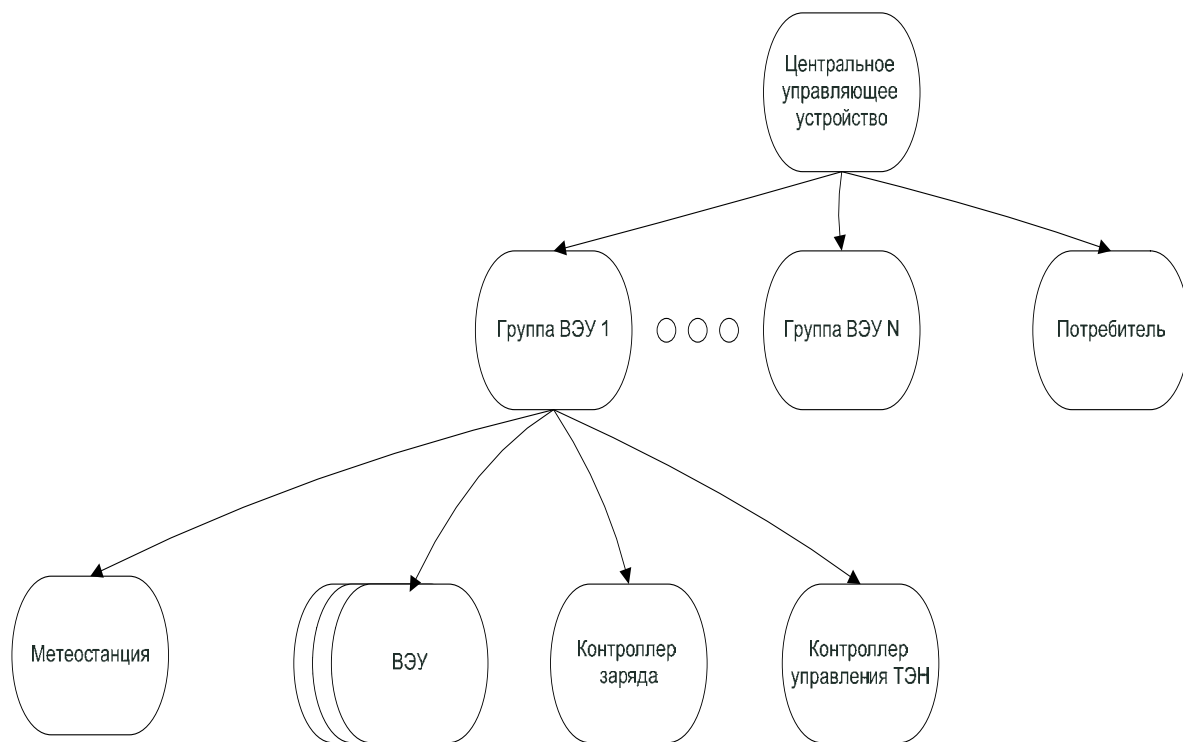


Рис. 2. Обобщенная схема иерархии системы

одна или несколько групп ВЭУ;  
потребитель;  
метеостанция;  
ВЭУ;  
контроллер заряда;  
контроллер управления нагревательными элементами.

Каждая отдельная сущность в свою очередь может быть разделена на подграф, за пример возьмем центральное управляющее устройство. На рис. 3 показан подграф для центрального управляющего устройства.

Наиболее важным качеством алгоритма принятия решений с использованием системы обучения с подкреплением и сети адаптивной критики для системы управления ветроэлектростанцией является то, что существует возможность объединения экспертных знаний специалистов, эксплуатирующих станцию, с параметрами, полученными с сенсоров системы через сеть обработки событий. Для выполнения данных требований реализован алгоритм сети адаптивной критики с использованием нечеткого вывода, обеспечивающий возмож-

ность настройки состояний системы с использованием правил нечеткой логики.

В среде Matlab разработана математическая модель ветропарка, в которой для обеспечения выработки 100 кВт используются пять ветроустановок с синхронными генераторами номинальной мощностью по 20 кВт.

Для математической модели проведены испытания, показавшие следующие результаты:

при использовании контроллера с алгоритмом поддержания максимальной быстроходности увеличение вырабатываемой мощности при скорости ветра 10 м/с составило 53,8 %, а при скорости ветра 5 м/с составило 318 % в сравнении с работой автономной ВЭС при отсутствии регулирования;

при использовании алгоритма управления, учитывающего взаимовлияние ветроустановок, увеличение вырабатываемой мощности при скорости ветра 10 м/с составило 0,3 %, а при скорости ветра 5 м/с составило 0,8 % в сравнении с работой автономной ВЭС при использовании алго-

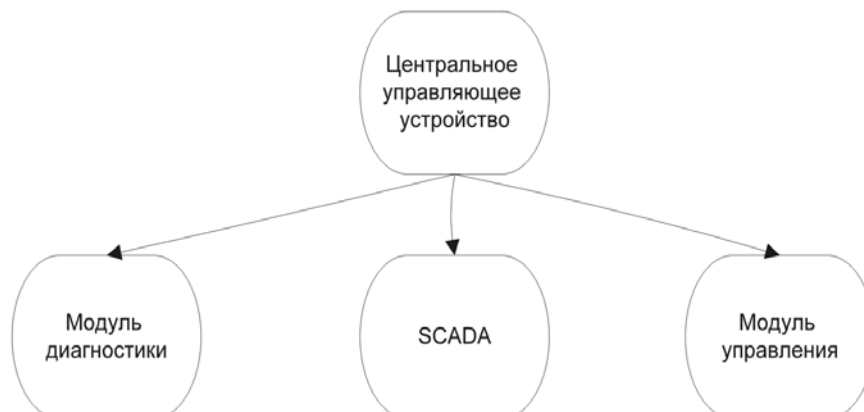


Рис. 3. Подграф для центрального управляющего устройства

ритма, при котором каждая ВЭУ стремится вырабатывать максимальную мощность.

Результаты показали эффективность разработанного алгоритма и целесообразность его практического применения.

Разработанный алгоритм управления обладает хорошими адаптивными качествами, использование алгоритма обучения с подкреплением позволяет быстро ввести в

эксплуатацию систему управления без длительного периода обучения, что характерно для классических алгоритмов управления с использованием нейронных сетей. Это позволяет сократить сроки интеграции системы в существующие ВЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», проект 2013-1.6-14-516-0112, ГК 14.516.11.0008.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pandey, K.** Maximum power point tracking of wind energy conversion system with permanent magnet synchronous generator [Text] / K. Pandey, A. Tiwari // *Internat. J. of Engineering Research & Technology (IJERT)*. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 5.

2. **Шкодырев, В.П.** Инновационные технологии в задачах управления большими распределенными системами [Текст] / В.П. Шкодырев // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 3-1(154). – С. 73–76.

3. **Johnson, K.** Wind farm control: addressing the aerodynamic interaction among wind turbines [Электронный ресурс] / K Johnson, T. Naveen // *American Control Conf.* – 2009.

4. **Marden, J.** A Model-Free Approach to Wind Farm Control Using Game Theoretic Methods [Электронный ресурс] / J. Marden S. Ruben, L. Pao // *IEEE Transactions On Control Systems Technology*. – Vol. 21. – № 4.

5. **van Dam, F.** A Maximum Power Point Tracking Approach for Wind Farm Control [Электронный ресурс] / F. van Dam, P. Gebraad, J.-W. van Wingerden // *Proc. of The Science of Mak-*

*ing Torque from Wind conf.* Oldenburg, Germany, 9–11 Oct. 2012.

6. **Sorensen, Paul.** Wind Farm Control [Электронный ресурс] / Paul Sorensen, Jesper R. Kristoffersen // *ECPE Seminar – Renewable energies*. – 2006.

7. **Farh Hassan, M.** Fuzzy logic control of wind energy conversion system [Text] / Hassan M. Farh, Ali M. Eltamaly // *J. of Renewable and Sustainable Energy*. – 2013

8. **Azouz, M.A.** Fuzzy Logic Control of Wind Energy Systems [Электронный ресурс] / M. Azouz, A. Shaltout M.A.L. Elshafei // *Proc. of the 14<sup>th</sup> Internat. Middle East Power Systems Conf. (MEPCON'10)*, Cairo Univ., Egypt, Dec. 19–21.

9. **Kyoungsoo, Ro.** Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system [Электронный ресурс] / Ro Kyoungsoo, Choi Han-ho // *Electrical Engineering*, 2005.

10. **Li, T.** Neural Network Compensation Control for Output Power Optimization of Wind Energy Conversion System Based on Data-Driven Control [Text] / T. Li, A. J. Feng, L. Zhao // *J. of Control*

Science and Engineering. –2012.

11. **Bayat, M.** Wind Energy Conversion Systems Control Using Inverse Neural Model Algorithm

[Text] / M. Bayat, M. Sedighzadeh, A. Rezazadeh. // Internat. J. of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – 2010.

#### REFERENCES

1. **Pandey K., Bayat M., Sedighzadeh M., Rezazadeh A.** Maximum power point tracking of wind energy conversion system with permanent magnet synchronous generator [Text] / Internat. J. of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2012. –Vol. 1. –Iss. 5.

2. **Shkodryev V.P.** Innovatcionnye tekhnologii v zadachakh upravleniia bol'shymi raspredelennymi sistemami / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie. –St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – № 3-1(154). – S. 73–76. (rus)

3. **Johnson K., Naveen T.** Wind farm control: addressing the aerodynamic interaction among wind turbines / American Control Conf., 2009.

4. **Marden J., Ruben S., Pao L.** A Model-Free Approach to Wind Farm Control Using Game Theoretic Methods / IEEE Transactions On Control Systems Technology. – Vol. 21. – № 4.

5. **van Dam F., Gebraad P., van Wingerden J.-W.** A Maximum Power Point Tracking Approach for Wind Farm Control / Proc. of The Science of Making Torque from Wind conf., Oct. 9-11, 2012, Oldenburg, Germany.

6. **Sorensen Paul, Kristoffersen Jesper R.** Wind Farm Control; ECPE Seminar – Renewable energies. – 2006.

7. **Farh Hassan M., Eltamaly Ali M.** Fuzzy logic control of wind energy conversion system / J. of Renewable and Sustainable Energy. – 2013.

8. **Azouz M., Shaltout A., Elshafei M.A.L.** Fuzzy Logic Control of Wind Energy Systems / Proc. of the 14<sup>th</sup> Internat. Middle East Power Systems Conf. (MEPCON'10), Cairo Univ., Egypt, Dec. 19–21.

9. **Kyoungsoo Ro, Han-ho Choi.** Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system / Electrical Engineering. – 2005.

10. **Li T., Feng A.J., Zhao L.** Neural Network Compensation Control for Output Power Optimization of Wind Energy Conversion System Based on Data-Driven Control / J. of Control Science and Engineering. –2012.

11. **Bayat M., Sedighzadeh M., Rezazadeh A.** Wind Energy Conversion Systems Control Using Inverse Neural Model Algorithm / Internat. J. of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – 2010.

---

**ЛОГИНОВ Анатолий Леонидович** – доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: a\_loginov@inbox.ru

**LOGINOV, Anatoly L.** St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: a\_loginov@inbox.ru

**ПОТЕХИН Вячеслав Витальевич** – доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: slava.potekhin@gmail.com

**ПОТЕХИН, Vyacheslav V.** St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: slava.potekhin@mail.ru

**АКУЛОВ Дмитрий Вадимович** – инженер кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: dmitryab87@ya.ru

**AKULOV, Dmitrii V.** St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: dmitryab87@ya.ru

**ХРИТОНЕНКОВ Антон Константинович** — аспирант кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: a.khritonenkov@gmail.com

**KHRITONENKOV, Anton K.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: a.khritonenkov@gmail.com

**ПОЛЕТАЕВ Иван Георгиевич** — ассистент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: polivager@mail.ru

**POLETAEV, Ivan G.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: polivager@mail.ru