

УДК 621.311.238:681.513.6

Ш.Д. Басаргин, Б.В. КавалеровПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
АДАПТИВНОГО ПОДХОДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫМИ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ**

Исследуются различные варианты использования адаптивного подхода при управлении промышленными объектами. Исследование представляет собой литературный обзор, оно выполнено с целью последующего использования перспективных вариантов адаптивного управления в практике создания систем управления газотурбинными электростанциями. Обсуждаются достоинства и недостатки рассмотренных вариантов построения адаптивных систем с точки зрения их возможного использования при совершенствовании газотурбинных электростанций. Среди рассмотренных в статье вариантов реализации адаптивного управления: псевдолинейное двухканальное корректирующее устройство, которое включается последовательно с регулятором; система адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности; синтез адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью для объекта с запаздыванием по управлению; адаптивное векторное управление асинхронным электродвигателем на основе метода рекуррентных целевых неравенств; алгоритмы эталонных моделей для построения устройств адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем; нейро-нечеткие модели для синтеза систем автоматического управления; регулирование скорости и положения исполнительного механизма; методики использующие типовые настройки вложенных друг в друга контуров регулирования; сравнительный анализ методов настройки ПИ-регулятора применительно к одному объекту управления. Обзор не претендует на полноту и общую структуризацию в проблемной области, в нем представлены лишь отдельные варианты применения адаптивного подхода при управлении техническими объектами. Поиск литературы для статьи осуществлялся по ключевым словам. Основное назначение обзора – получение в перспективе новых научных результатов за счет перенесения рассмотренных апробированных алгоритмов управления на новый объект – газотурбинную электростанцию.

Ключевые слова: система автоматического управления, адаптивное управление, эталонная модель, газотурбинная установка, газотурбинная электростанция.

Sh.D. Basargin, B.V. Kavalero

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF OPTIONS OF USE ADAPTIVE APPROACH FOR CREATION OF PERSPECTIVE CONTROL SYSTEMS OF THE GAS-TURBINE POWER PLANTS

This article explores various options for using an adaptive approach to management of industrial facilities. The study is a literature review, it is performed in order to use advanced options for adaptive management in the practice of creating management systems gas turbine power plants. The advantages and disadvantages of the considered variants of adaptive systems in terms of their potential use in the improvement of gas turbine power plants. Among the options considered implementation of adaptive control: two-channel pseudo-correcting device, which is in series with the regulator; Adaptive control of reactive power compensation; the synthesis of an adaptive control system with an implicit reference model for the object with delayed control; adaptive vector control asynchronous motor based on the method of recurrent objective inequalities; algorithms reference models for building adaptive devices sync generators and parts of electric power systems; neuro-fuzzy model for the synthesis of automatic control systems; regulation of the speed and position of the actuator; The technique uses standard configuration of nested control loops; Comparative analysis of methods of adjustment PI in relation to one aspect of management. The survey does not claim to be complete and overall structuring of the problem areas. The review presents only a few applications of the adaptive approach in the management of technical objects. A literature search was carried out by keyword. The main purpose of the review – to provide a perspective of new scientific results through the transfer of proven control algorithms discussed the new object - gas turbine power station.

Keywords: automatic control system, adaptive control reference model, gas turbine, gas turbine power plant.

Введение. Активно развиваемым направлением отечественной авиадвигателестроительной промышленности является создание газотурбинных электростанций мощностью до 25 МВт и выше на базе конвертированных авиационных газотурбинных установок (ГТУ). Такие ГТУ вращают синхронные генераторы, вырабатывающие электроэнергию, поэтому они являются источником мощности газотурбинных электростанций. В статье [1] рассмотрена и обоснована необходимость исследования адаптивного управления такими газотурбинными электростанциями для последующего построения надежных активно-адаптивных систем электроснабжения. Необходимость использования адаптивного подхода объясняется постоянным изменением характеристик ГТУ и внешней среды с учетом поведения электрической нагрузки газотурбинной электростанции (ГТЭС). Поэтому для поддержания высоких показателей качества систем автоматического управления (САУ) ГТЭС целесообразно рассмотреть возможность применения самонастройки и самоорганизации

САУ при изменении условий работы и характеристик электрической нагрузки ГТЭС. При этом требования к таким ГТЭС сегодня существенно повышаются из-за их работы в единой системе с другими источниками энергии и при всё более широком использовании активных элементов, изменяющих топологические параметры электрической сети. При этом известно, что даже простейшие системы, например, системы управления двух основных силовых модулей электростанции: газотурбинной установки и синхронного генератора (СГ) на практике, нередко конфликтуют между собой, что может приводить к аварийным ситуациям [2]. На сегодня текущая практика использования адаптивного подхода в системах управления ГТЭС отстает от теоретически возможных результатов [1]. В литературе неоднократно отмечалось, в частности в работах профессора МЭИ В.Я. Роточа [3, 4], что многие схемы идентификации и адаптации нередко работают только «на бумаге» и в идеальных условиях, т.е. оторваны от реальных экспериментальных условий. Помимо этого при выборе целей адаптации необходимо использовать системный подход, так как нередко имеет место конфликт целей, например, рассчитанное и от моделированное оптимальное управляющее воздействие, как показывает опыт, может приводить к преждевременному выходу из строя энергоустановки из-за износа подвижных, трущихся частей [1]. Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.832.2014/К.

Адаптивные системы автоматического управления. В статье [5] представлена структурная схема псевдолинейного двухканального корректирующего устройства (рис. 1). Данное устройство включается последовательно с регулятором. Преимущество этого способа заключается в том, что в процессе работы системы параметры регулятора не меняются и соответствуют настройке, предшествующей запуску системы. В процессе работы системы регулирования, в зависимости от изменения параметров объекта управления, меняется коэффициент передачи корректора или создаваемый им фазовый сдвиг. Эти изменения происходят только в тех случаях, когда качество САУ становится неудовлетворительным вследствие изменения свойств объекта управления или из-за воздействия на объект управления возмущений. Это позволяет обеспечить устойчивость системы и повысить качество переходных процессов [5]. Результаты исследования САУ с линейными корректирующими устройствами показали, что процедура адаптации

линейных корректоров даже при использовании современного математического аппарата, например нечеткой логики, возможна лишь при ограниченных по диапазону и характеру изменениях параметров объекта управления [5]. Зато исследования, проведенные авторами работы [5], показали, что псевдолинейные корректирующие устройства являются наиболее эффективными для реализации адаптивных систем.

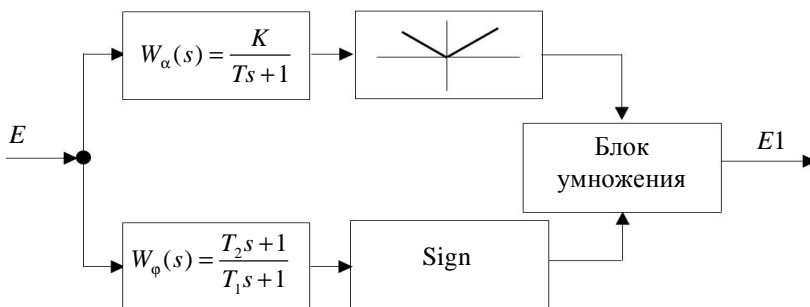


Рис. 1. Структурная схема псевдолинейного двухканального корректирующего устройства

Изменением параметра настройки амплитудного канала корректора K в пределах от 1,70 до 0,15, при фиксированном значении $T = 1$ с, можно задать на частоте $\omega_0 = 0,4$ рад/с (частота поискового сигнала) требуемое значение АЧХ в пределах от 0 до -21 дБ соответственно, а изменением параметра настройки T_2 фазового канала корректора в пределах от 1,2 до 100 с, при фиксированном значении $T_1 = 0,1$ с, можно задать требуемое значение фазового сдвига, вносимого корректирующим устройством, от 0 до 83° соответственно [5].

Далее в статье рассматривается включение корректирующего устройства в состав системы автоматического регулирования (САР), которая представлена на рис. 2, где использованы следующие обозначения: G – задающее воздействие системы управления; U – управляющее воздействие; Y – выход объекта управления; $W_{\text{об}}(s)$ – передаточная функция объекта управления; $W_{\text{рег}}(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{\text{пдк}}(s)$ – передаточная функция псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; Φ – полосовой фильтр; БНПДКУ – блок настройки псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; БОЧХ – блок определения частотных характеристик; $A_0 \sin \omega_0 t$ – поисковый сигнал. В качестве полосового фильтра взят фильтр Чебышева второго порядка.

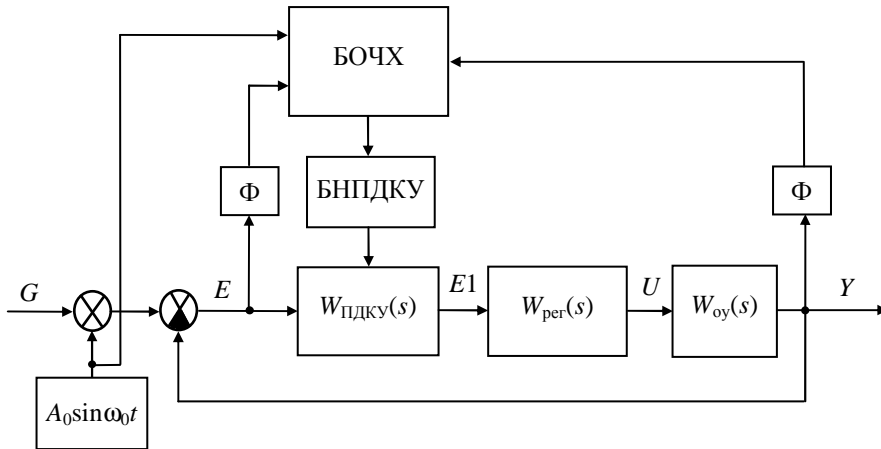


Рис. 2. Структурная схема САР с адаптивным псевдолинейным двухканальным корректирующим устройством

В процессе работы системы с течением времени происходит изменение параметров объекта управления. Другими словами, происходят изменения коэффициента передачи объекта управления и вносимого им фазового сдвига. Адаптивное псевдолинейное корректирующее устройство в процессе работы осуществляет определение на частоте поискового сигнала изменения коэффициента передачи и фазового сдвига объекта управления относительно заданных. После чего вносит в систему фазовый сдвиг и меняет коэффициент.

Исследование свойств системы с адаптивным псевдолинейным двухканальным корректором авторами [5] проводилось в программном пакете MatLab 6.5. Моделирование систем автоматического регулирования проводилось для объектов первого, второго и третьего порядка. На рис. 3 представлены кривые переходных процессов в системах регулирования только с ПИД-регулятором (кривая 2) и регулятором, дополненным последовательно включенным в цепь управления адаптивным псевдолинейным двухканальным корректирующим устройством (кривая 1).

Эти кривые наглядно иллюстрируют способность адаптации САР к изменению параметров объекта управления. Авторы [5] делают заключение, что применение предлагаемого корректирующего устройства и способа реализации адаптивной системы на основе его подстройки позволяет реализовать систему регулирования объектами с нестационарными параметрами, изменяющимися в процессе работы в широком диапазоне, за счет повышения запаса устойчивости по амплитуде и фазе.

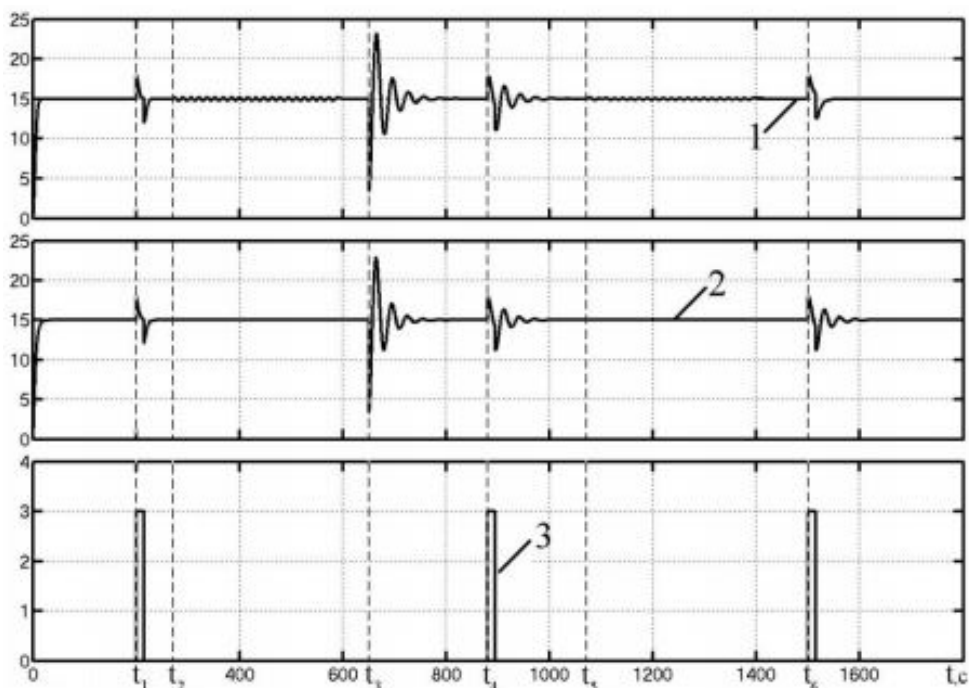


Рис. 3. Кривые переходных процессов

Таким образом, авторы статьи [5] преодолевают недостатки традиционной схемы, где адаптация осуществляется на основе идентификации объекта управления с последующим решением задачи определения параметров ПИД-регулятора. Основными недостатками при этом являются сложность реализации процедуры идентификации и ограниченные возможности изменения динамических свойств САУ путем изменения параметров ПИД-регулятора [5]. Данная схема может оказаться полезной при управлении ГТЭС, где традиционно используются ПИД-регуляторы, привлекательным выглядит и подстройка корректирующего устройства вместо стандартного ПИД-регулятора, однако наличие поискового сигнала вызывает вполне объяснимые проблемы.

В [6] рассматривается система адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности.

Среди устройств управления параметрами реактивной мощности конденсаторные батареи являются наиболее эффективными для использования в условиях городских сетей электроснабжения. Наиболее оптимальным и надежным решением является использование в качестве коммутационной аппаратуры управляемых тиристоров [6]. Устройство

представляет собой два симметричных блока (рис. 4). В каждом блоке трехфазные группы соединены в треугольник. Таким образом, с конденсаторами подключаются два встречно-параллельно-соединенных вентиля 3 и 4. Конденсаторные батареи БК1, БК2 и вентили включаются в сеть через трехфазный трансформатор. Обмотки трансформаторов 5 и 6 должны быть соединены таким образом, чтобы суммарный ток блоков не имел гармоник, кратных трем, которые, как показывают теоретические и имитационные исследования, являются самыми большими в токе ИРМ. Этого можно достигнуть, если для одного трансформатора выбрать схему соединения обмоток «звезда–звезда», а для другого – «звезда–треугольник». При подсоединении конденсаторов в треугольник компенсируются третья и кратная ей гармоники тока.

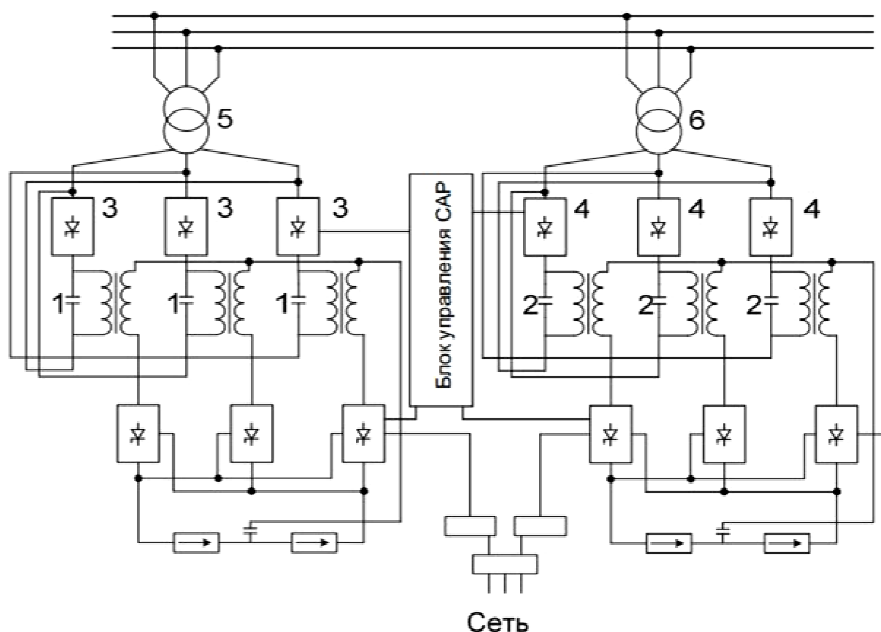


Рис. 4. Принципиальная схема устройства автоматического регулирования реактивной мощности

Микропроцессорная автоматическая система адаптивного управления и защиты статическими компенсаторами основывается на базе современного микропроцессора. Она производит не только автоматическое регулирование величины действующего напряжения повышения и коэффициента реактивной мощности СТК, но и противоаварийное управление: защиту тиристорных преобразователей, снижение

перенапряжений, дискретное увеличение требуемого напряжения (уставки) по сигналу противоаварийной автоматики.

Система для регулирования реактивной мощности в электрической сети дает возможность с высоким быстродействием выполнять дискретно-непрерывное регулирование реактивной мощности. При этом устройство обеспечивает высокую устойчивость работы коммутационной аппаратуры секций КБ в режимах переходных процессов. Это может быть достигнуто путем исключения ложного срабатывания каналов генерации управляющих воздействии устройствами коммутации секций конденсаторных батарей [6].

Материалы статьи [6] могут быть полезны при рассмотрении, прежде всего, вопросов совершенствования САУ СГ в ГТЭС для поддержания уровня напряжения в системе электроснабжения.

В работе [7] предлагается синтез адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью для объекта с запаздыванием по управлению. Для компенсации постоянного запаздывания по управлению в основной контур вводится упредитель-компенсатор. Результаты имитационного моделирования синтезированной системы управления показывают, что при постоянных внешних воздействиях использование адаптивных алгоритмов настройки параметров регулятора с местными отрицательными обратными связями, неявной эталонной модели и схемы с расширенной ошибкой позволяет повысить качество функционирования адаптивной системы для априорно-неопределенного неустойчивого объекта с запаздыванием по управлению и относительным порядком передаточной функции, большим единицы.

С целью иллюстрации полученных результатов в [7] рассмотрен пример имитационного моделирования. В ходе имитационного моделирования осуществлялся подбор параметров закона управления с точки зрения обеспечения более высокого качества функционирования системы управления. Моделирование выполнялось в среде Simulink пакета MatLab 7.11.0. Результаты моделирования представлены на рис. 5 и 6.

Таким образом, в работе [7] вводится упредитель-компенсатор

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = A_k x_k(t) + B_k (u(t) - u(t-h)), \quad y_k(t) = x_{k,1}(t),$$

где $x_k(t) \in R^p$, $y_k(t) \in R$ – выход упредитель-компенсатора. Его использование может быть проверено и при разработке перспективных

САУ для ГТЭС, поскольку запаздывание имеет место при управлении ГТУ, например, по причине газовой связи между валами в двух-вальных ГТУ [8].

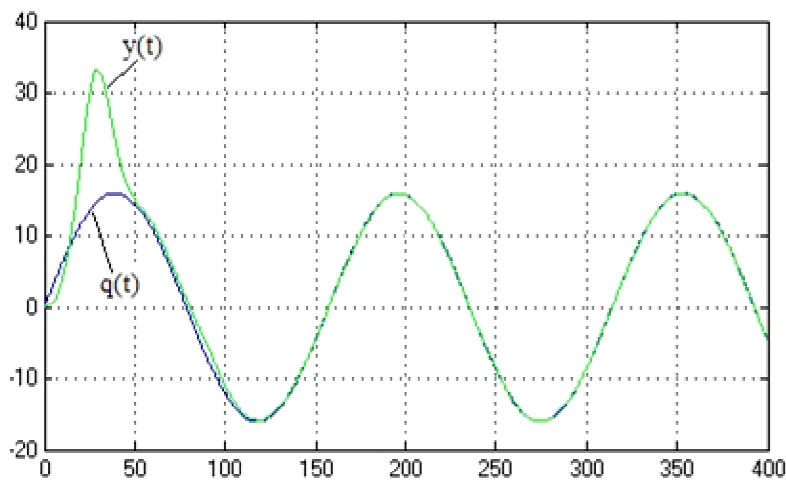


Рис. 5. Выход объекта управления $y(t)$ и задающее воздействие $q(t)$

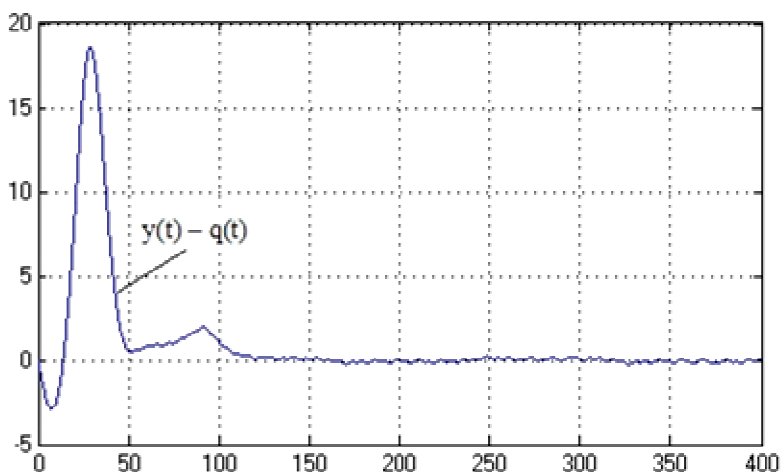


Рис. 6. Сигнал рассогласования между выходом объекта $y(t)$ и задающим воздействием $q(t)$

Статья [9] рассматривает адаптивное векторное управление асинхронным электродвигателем на основе метода рекуррентных целевых неравенств. Здесь показаны результаты моделирования асинхронного электродвигателя с векторным пропорционально-интегральным управлением. Вместо истинных значений потокосцепления ротора используются

выходы наблюдателей. В качестве прототипа для моделирования используется асинхронный привод электрического усилителя рулевого управления автомобиля.

Статья [9] посвящена, во-первых, обоснованию работоспособности некоторого конкретного алгоритма векторного управления асинхронным электродвигателем без измерения скорости вращения ротора, но с использованием значений тока статора и вектора потокосцепления ротора. Регулируемыми величинами служат электромагнитный момент на валу двигателя и абсолютная величина потокосцепления ротора. Показано, что рассматриваемый регулятор обеспечивает устойчивость в малом регулируемых величин относительно их заданных значений и при этом регулятор не чувствителен к параметрическим возмущениям. Во-вторых, поскольку измерение потокосцепления по постановке задачи предполагается невозможным, предлагается адаптивный наблюдатель вектора потокосцепления. Рассматриваемый адаптивный наблюдатель построен на основе метода рекуррентных целевых неравенств (РЦН) [9].

Сами авторы отмечают, что достаточным условием работоспособности построенных наблюдателей служит труднопроверяемое условие невырожденности некоторых их внутренних сигналов, порождаемых в процессе функционирования замкнутой системы. Аналитическая проверка аналогичных условий весьма сложна даже для линейных объектов управления. Численный эксперимент показывает, однако, что для рассматриваемых систем оно выполняется [9]. С помощью математического моделирования планируется рассмотреть этот подход при проведении исследований с САУ ГТЭС.

Статья [10] рассматривает алгоритмы эталонных моделей для построения устройств адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем. Основу синтезируемого устройства синхронизации составляет типовая структурно-функциональная схема систем автоматического управления с эталонной моделью, адаптированная к условиям работы в составе электроэнергетической системы (ЭЭС) (рис. 7).

Эталонная модель в этой схеме формируется в ходе процесса в виде программной траектории движения (ПТД), представляющей собой рассчитанное (желаемое) движение векторов напряжения генера-

тора и сети или синхронизируемых частей ЭЭС. Принимая во внимание, что равенство напряжений по абсолютному значению достигается воздействием на автоматический регулятор возбуждения генератора, что не представляет существенных трудностей [11], основным целевым условием построения ПТД является достижение нулевых значений управляемых параметров: относительного угла ($\delta = \delta_2 - \delta_1 = 0$), относительной скорости (разности частот) ($\nu = \omega_2 - \omega_1 = 0$) и относительного ускорения ($\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 0$) векторов напряжения синхронизируемых объектов в конечной точке интервала управления.

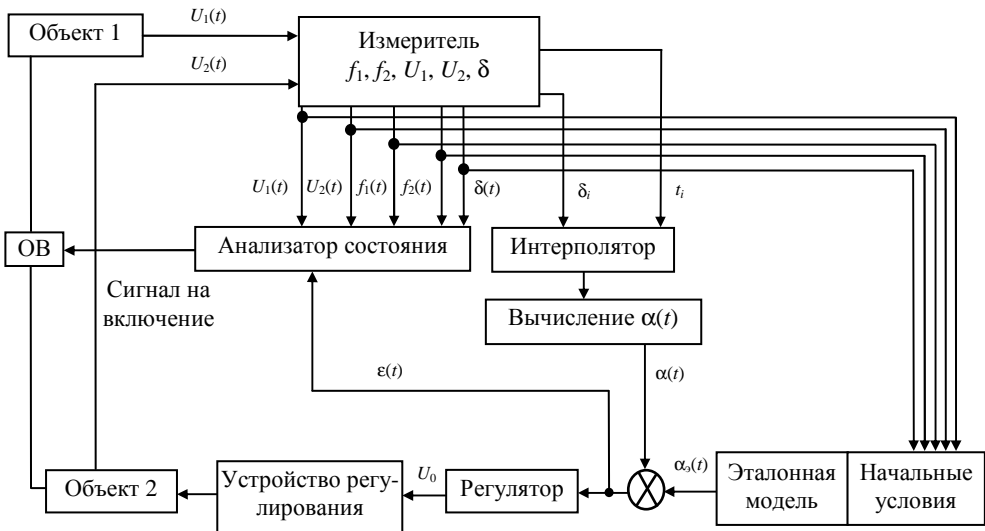


Рис. 7. Структурно-функциональная схема устройства синхронизации объектов 1 и 2 (генератор–сеть или две части ЭЭС) с эталонной моделью

Рассмотренная статья [10] представляет интерес, поскольку вопросам синхронизации ГТЭС и ЭЭС уделяется повышенное внимание, кроме того, представленный в статье алгоритмический аппарат может использоваться и в других приложениях в составе перспективных активно-адаптивных систем электроснабжения [12, 13].

В статье [14] рассмотрен новый алгоритм адаптации для системы с эталонной моделью, который получен без предположения о квазистационарности режима функционирования нестационарного объекта и обеспечивает высокую точность управления независимо от интенсивности и спектрального состава входных воздействий. Новый

алгоритм использует возможность сочетания принципов реализации систем с эталонной моделью и систем с переменной структурой.

К сожалению, авторы [14] констатируют и негативные стороны предлагаемого алгоритма. Перечислим некоторые из них:

1) алгоритм функционирует при весьма значительном ограничении в виде неравенства;

2) алгоритм основан на компенсации суммарного координатного и параметрического возмущения. В результате теряется одно из замечательных свойств традиционных алгоритмов функционирования систем с эталонной моделью, когда вместе с компенсацией параметрического возмущения по каждому из коэффициентов системы одновременно решается и задача идентификации этого параметрического возмущения;

3) в предлагаемом алгоритме не решается задача уменьшения информации о движении системы; скорее, наоборот, необходимо вводить звено оценки, с помощью которого можно получить дополнительную информацию;

4) предлагаемый алгоритм работы системы с эталонной моделью приводит к необходимости отыскания области сходимости движения системы.

При управлении ГТЭС рассматриваемый алгоритм может оказаться весьма полезным как положительный пример использования синергетического эффекта от сочетания двух и более известных принципов построения систем управления.

В статье [15] представлен очень удачный обзор нейронечетких моделей с целью использования в задачах анализа и синтеза систем автоматического управления. Эти модели могут быть реализованы несколькими способами. В простейшем случае совместную модель можно рассматривать как препроцессор, где механизм обучения искусственной нейронной сети (ANN) определяет правила нечеткого вывода (FIS). Как только параметры FIS определяются, ANN работает в обычном режиме. Функции принадлежности обычно аппроксимируются нейронной сетью из обучающих данных. Другой подход в реализации нейронечетких моделей – это параллельная модель, которой нейронная сеть помогает нечёткой системе определить требующиеся параметры, особенно если входные переменные системы не могут быть непосредственно измерены. Обучение происходит только в нейронной сети, и нечёткая система остается неизменной. В некоторых случаях нечёт-

кие выходы не могут быть непосредственно применены к процессу. В этом случае нейронная сеть может действовать как постпроцессор нечётких выходов. Наиболее распространёнными являются интегрированные модели, в которых обучающий алгоритм нейронной сети используется для определения параметров системы нечёткого вывода. Нечёткая система вывода и соответствующие функции принадлежности базируются на априорных знаниях системы. С другой стороны, механизм обучения нейронной сети не зависит от априорной информации, а является стандартным для выбранной архитектуры искусственной нейронной сети.

Выбор нейронечетких моделей осуществляется в зависимости от класса решаемых задач.

Анализ существующих нейронечетких моделей показал, что выбор типа модели зависит от многих факторов. В качестве ориентира используются для повышения «интеллекта»: быстрота обучения, онлайн-адаптивность, достижение глобального уровня ошибок и недорогие вычисления.

Проблемным также является процесс обучения, который не гарантирует оптимальности в глобальном смысле. Исследования показывают, что техника градиента спуска находит локальный оптимум. Применение глобальных процедур оптимизации позволяет предотвратить «попадание в ловушку» локального оптимума, но увеличивает трудоемкость алгоритма.

Статья [15] достаточно глубоко выявляет основные проблемные стороны использования нейронечетких моделей в автоматическом управлении.

Статья [16] посвящена сравнительному анализу методов настройки ПИ-регулятора применительно к одному объекту управления. Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность использования метода настройки при помощи нейронечеткой сети, проводится анализ нейронечетких сетей.

В последнее время широкую популярность находят нечеткие модели и алгоритмы управления. Одним из научных направлений в данной области является нечеткая коррекция настроек ПИ-регулятора по анализу качества переходных процессов [16].

Как видно из проведенного анализа, наилучшие показатели обеспечили нейронечеткие сети; нечеткая логика обеспечила адаптивность

настройки ПИ-регулятора, но качество переходного процесса ниже по сравнению с фиксированной настройкой ПИ-регулятора (рис. 8). Также обнаружено ухудшение показателей качества САУ по сравнению с показателями, полученными при настройке ПИ-регулятора по методу Куна при номинальных значениях параметров объекта управления.

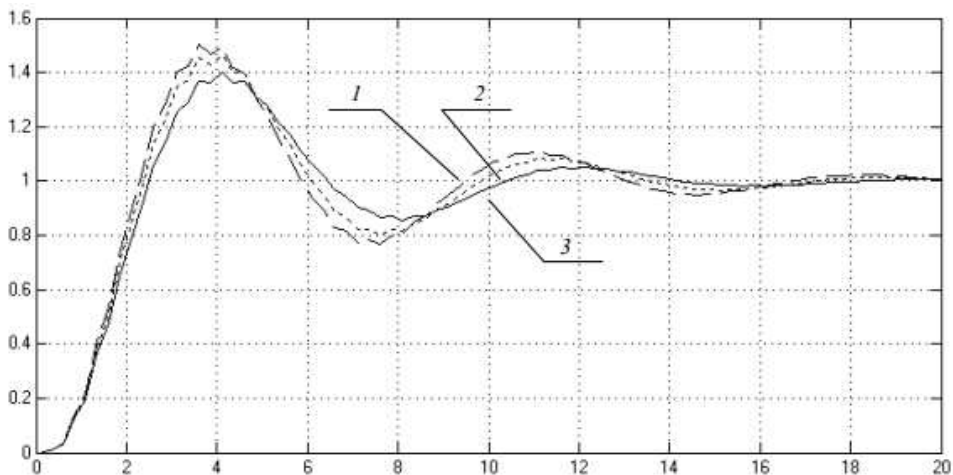


Рис. 8. Переходная характеристика САУ с применением метода настройки ПИ-регулятора: 1 – по методу Куна; 2 – по алгоритму Мамдани–Сугено; 3 – при помощи нейронечеткой сети ANFIS

В статье [17] рассматриваются методики, использующие типовые настройки вложенных друг в друга контуров регулирования на модульный или симметричный оптимумы, и проблемы в них, ведущие к необходимости использования новых способов построения электро-механических систем управления (ЭМСУ) и синтеза алгоритмов цифрового управления электроприводами. Приводится схема моделирования динамики следящей электро-механической системы управления.

В качестве критерия оптимизации авторы обосновывают применение критерия предельного быстродействия, который в детерминированных дискретных линейных системах обеспечивает одновременно минимум интегральной динамической ошибки управления при отсутствии перерегулирования выходной координаты.

В статье на основании графиков переходных процессов делается вывод, что в синтезированной системе управления отсутствуют недостатки, выявленные в дискретно-непрерывной ЭМСУ без эталонной модели. Но здесь надо заметить, что результаты математического мо-

делирования не могут быть доказательствами того или иного аналитического факта [14], поэтому дополнительные аналитические выкладки были бы желательны.

Авторы отмечают ряд достоинств и недостатков своей системы. С точки зрения управления ГТЭС важным достоинством является то, что для синтеза ЭМСУ может быть использована линейная теория управления, и структура регулятора самой ЭМСУ при этом будет линейной. Ключевым недостатком выглядит снижение быстродействия системы при увеличении величины задания на входе.

Статья [18] рассматривает регулирование скорости и положения исполнительного механизма, соединенного с электроприводом через упругую кинематическую передачу, содержащую зазор. Содержится математическое описание трехмассового объекта радиотелескопа (рис. 9).

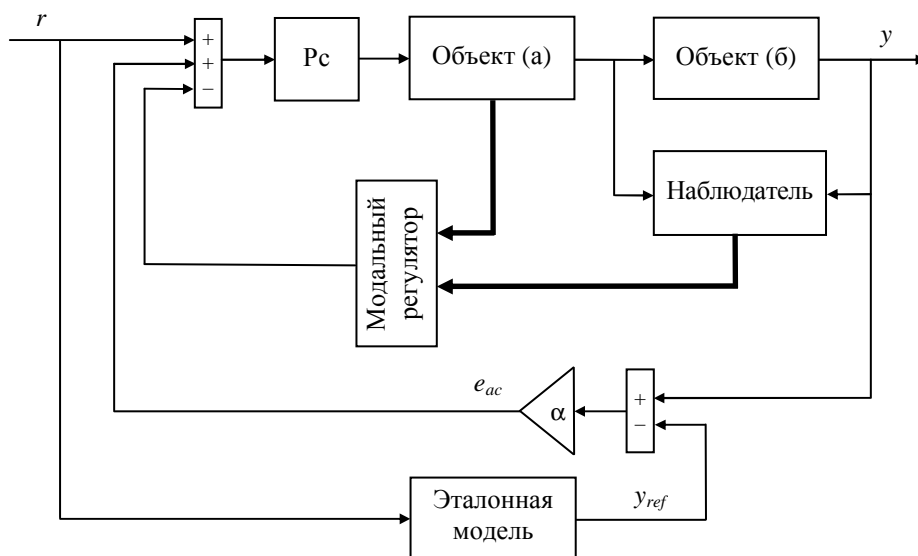


Рис. 9. Структурная схема системы управления радиотелескопа с модально-адаптивным регулятором

Также в [18] выполнен расчет модального регулятора путём разделения объекта управления на две части: объект (а) с непосредственными обратными связями, объект (б) с обратными связями по идентифицированным переменам от наблюдателя. При расчетах модального регулятора на основе трехмассовой модели использованы матрицы пятого порядка. В конце статьи авторы делают вывод о том, что адаптивное управление обеспечивает больше быстродействия объекту, а также

система успешно устраняет действие ветра на объекте. Подобный подход даст высокую точность наведения и робастность против различных возмущений или изменения параметров объекта.

Заключение. Представленный обзор не претендует на полноту и общую структуризацию в проблемной области. В обзоре представлены отдельные достаточно разрозненные варианты применения адаптивного подхода при управлении техническими объектами. Тем не менее хорошо известно, что новые научные результаты могут быть получены и за счет перенесения апробированных алгоритмов управления на новый объект. С этой точки зрения и было построено изложение: рассматриваемые принципы управления изучались применительно к возможности их последующего использования при управлении автономными и неавтономными ГТЭС различной мощности. Конечно, при этом обязательно возникают новые проблемы, поэтому настоящая статья должна рассматриваться в качестве не более чем одного из первых шагов в заявленном направлении.

Библиографический список

1. О задачах исследования адаптивного управления электростанциями на базе конвертированных авиационных ГТУ / Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, Г.А. Килин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 65–77.

2. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 11.1. – С. 129–132.

3. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Клюев [и др.]; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 400 с.

5. Скоропешкин В.Н., Скоропешкин М.В. Адаптивная система автоматического регулирования // Наукоедение: интернет-журнал. –

2014. – Вып. 2 [Электронный ресурс]. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/83TVN214.pdf> (дата обращения: 09.04.2015).

6. Ершов С.В. Карницкий В.Ю. Разработка системы адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Известия Тульск. гос. ун-та. Технические науки. – 2014. – Вып. 8 [Электронный ресурс]. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-adaptivnogo-regulirovaniya-kompensatsii-reaktivnoy-moschnosti> (дата обращения: 01.04.2015).

7. Чепак Л.В., Мезенцева А.В. Моделирование адаптивно-робастной системы для скалярного объекта с запаздыванием по управлению // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1. – 188–193.

8. Авиационные ГТД в наземных установках / С.П. Изотов, В.В. Шашкин, В.М. Капралов [и др.] – Л.: Машиностроение, 1984. – 228 с.

9. Бондарко В.А. Адаптивное векторное управление асинхронным электродвигателем на основе метода рекуррентных целевых неравенств // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 9. – С. 120–135.

10. Хрущев Ю. В., Беляев Н.А. Алгоритмы эталонных моделей для построения устройств адаптивной синхронизации генераторов и частей энергетических систем // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 168–174.

11. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», 2000. – 504 с.

12. Филиппов М.В., Кавалеров Б.В. К вопросу интеллектуализации локальных электрических сетей с газотурбинными мини-электростанциями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 9. – С. 115–133.

13. Опарин Д.А., Кавалеров Б.В. О моделировании газотурбинных установок при управлении электростанциями малой и средней мощности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 12. – С. 5–13.

14. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – С. 35–44.

15. Андриевская Н.В., Резников А.С., Черанев А.А. Особенности применения нейронечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–7. – С. 1445–1449.

16. Поступаева С.Г., Грязнов И.Е. Работа САУ, основанных на традиционных и нетрадиционных методах настройки регулятора // *Известия Волгоград. гос. техн. ун-та*. – 2013. – № 20(123). – Т. 10. – С. 117–121.

17. Даденков Д.А., Казанцев В.П. Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 17–7. – С. 1466–1471.

18. Абрахим А.А. Управление скоростью трёхмассового радиотелескопа на основе модального и адаптивного управления // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 2. – URL: www.science-education.ru/108-8667 (дата обращения: 19.05.2015).

References

1. Kavalero B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. [et al.]. O zadachakh issledovaniia adaptivnogo upravleniia elektrostantsiami na baze konvertirovannykh aviatsionnykh GTU [About tasks to research the adaptive power station operation based on converted aircraft gas turbines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 11, pp. 65-77.

2. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., Kavalero B.V., Shigapov A.A. Issledovanie vzaimovlianiia sistem upravleniia gazoturbinnoi ustanovkoi i elektrogeneratorom pri avtomatizirovannoi nastroiike regulatorov [The study of gas turbine control systems and electric generator interference under the automated regulator adjustment]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 11.1, pp. 129-132.

3. Rotach V.Ia., Kuzishchin V.F., Kliuev A.S. [et al.]. Avtomatizatsiia nastroiiki sistem upravleniia [Automation of management system configuration]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 272 p.

4. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Automatic control theory]. Moskovskii energeticheskii institut, 2005. 400 p.

5. Skoropeshkin V.N., Skoropeshkin M.V. Adaptivnaia sistema avtomaticheskogo regulirovaniia [Adaptive system of automatic control]. *Naukovedenie*, iss. 2, 2014, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/83TVN214.pdf> (accessed 09 April 2015).

6. Ershov S.V. Karnitskii V.Ju. Razrabotka sistemy adaptivnogo regulirovaniia kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Development of adaptive control system of reactive power compensation]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, vol. 8, available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-adaptivnogo-regulirovaniya-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti> (accessed 01 April 2015).

7. Chepak L.V., Mezentseva A.V. Modelirovanie adaptivno-robastnoi sistemy dlia skaliarnogo ob"ekta s zapazdyvaniem po upravleniiu [Modeling of adaptive robust system for a scalar object with delay management]. *Vestnik Caratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 188-193.

8. Izotov S.P., Shashkin V.V., Kapralov V.M. [et al.]. Aviatsionnye GTD v nazemnykh ustanovkakh [Airplane GTE on the land-based plants]. Leningrad: Mashinostroenie, 1984. 228 p.

9. Bondarko V.A. Adaptivnoe vektornoe upravlenie asinkhronnym elektrodvigatelem na osnove metoda rekurrentnykh tselevykh neravenstv [The adaptive vector control of asynchronous motor, based on the recurrent objective inequalities method]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2010, no. 9, pp. 120-135.

10. Khrushchev Ju. V., Beliaev N.A. Algoritmy etalonnykh modelei dlia postroeniia ustroystv adaptivnoi sinkhronizatsii generatorov i chastei energeticheskikh sistem [Algorithms of reference models for build up of devices for adaptive oscillators locking and parts of energy systems]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 323, no 4, pp. 168-174.

11. Ovcharenko N.I. Avtomatika elektricheskikh stantsii i elektroenergeticheskikh sistem [Automation of electric power plants and systems]. Moscow: Novacionnyj centr "JeNAS", 2000. 504 p.

12. Filippov M.V., Kavalero B.V. K voprosu intellektualizatsii lokal'nykh elektricheskikh setei s gazoturbinnymi mini-elektrostantsiiami [On the question of intellectualization of local electric networks with a mini-turbine power plants]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*

politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia, 2014, no. 9, pp. 115-133.

13. Oparin D.A., Kavalero B.V. O modelirovanii gazoturbinnnykh ustanovok pri upravlenii elektrostantsiiami maloi i srednei moshchnosti [On the modeling of gas turbines in cases of small and medium power plants management]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 12, pp. 5-13.

14. Zemliakov S.D., Rutkovskii V.Iu. Algoritm funktsionirovaniia adaptivnoi sistemy s etalonnou model'iu, garantiruiushchii zadannuiu dinamicheskuiu tochnost' upravleniia nestatsionarnym dinamicheskim ob'ektom v usloviakh neopredelennosti [The algorithm of functioning of the adaptive system with a reference model which guarantees a predetermined dynamic accuracy of time-dependent dynamic object control under conditions of uncertainty]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2009, no. 10, pp. 35-44.

15. Andrievskaia N.V., Reznikov A.S., Cheranov A.A. Osobennosti primeneniia neuro-nechetkikh modelei dlia zadach sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniia [Features of the application of neuro-fuzzy models for the problems of synthesis of automatic control systems]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no. 11-7, pp. 1445-1449.

16. Postupaeva S.G., Griaznov I.E. Rabota SAU, osnovannykh na traditsionnykh i netraditsionnykh metodakh nastroiiki reguliatora [The work of ACS, based on traditional and non-traditional methods of controller settings]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 20(123), vol. 10, pp. 117-121.

17. Dadenkov D.A., Kazantsev V.P. Sintez elektromekhanicheskikh sistem upravleniia s nelineinoui adaptivnoi etalonnou model'iu [Synthesis of electromechanical control systems with nonlinear adaptive reference model]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no. 17-7, pp. 1466-1471.

18. Abrakhim A.A. Upravlenie skorost'iu trekhmassovogo radioteleskopa na osnove modal'nogo i adaptivnogo upravleniia [Speed control of the three-mass volume telescope based on modal and adaptive management]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 2, available at: www.science-education.ru/108-8667 (accessed 19 May 2015).

Сведения об авторах

Басаргин Шамиль Давидович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: b.shamil.d@gmail.com).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Basargin Shamil Davidovich (Perm, Russian Federation) is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: b.shamil.d@gmail.com).

Kavalerov Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is Doctor of Technical Sciences, Associate Professor the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено: 06.07.2015