

На правах рукописи

Браганец Семен Александрович

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОТКРЫТИЕМ
НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ГИДРОАГРЕГАТА С ПОВОРОТНО-
ЛОПАСТНОЙ ТУРБИНОЙ**

05.11.16. – Информационно-измерительные и управляющие системы
(в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2014

Работа выполнена на кафедре «Автоматика, электроника и вычислительная техника» в Волжском политехническом институте (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» («ВолгГТУ»)

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент
Гольцов Анатолий Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Кудинов Юрий Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Липецкий
государственный технический
университет», кафедра
«Информатика», заведующий

Бельчанская Елена Николаевна
кандидат технических наук, ОАО
«Волжский завод асбестовых
технических изделий», главный
метролог

Ведущая организация

Филиал Национального
исследовательского университета
«МЭИ» в г. Волжском

Защита состоится 23 мая 2014 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.028.05, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан « ___ »

2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Авдеюк Оксана Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Основным узлом ГЭС, обеспечивающим выработку электроэнергии, является гидроагрегат, включающий в себя гидротурбину и гидрогенератор. В качестве гидротурбин наибольшее распространение получили поворотно-лопастные турбины. Одним из важнейших узлов турбины является система управления открытием направляющего аппарата (НА), позволяющая регулировать мощность и частоту гидроагрегата. Основным элементом данной системы – электрогидравлический преобразователь (ЭГП).

Точность управления и надежность работы данного узла влияет на работу гидроагрегата в целом. В существующей системе для настройки регуляторов используются упрощенные линейные модели в виде передаточных функций с постоянными параметрами, в то время как данный узел является нелинейным. В настоящее время настройка регулятора осуществляется один раз при пуско-наладочных испытаниях в номинальном режиме работы гидроагрегата. Однако в настоящее время широко внедряется система группового регулирования активной мощности гидроагрегатами (ГРАМ). При работе на ГРАМ задание мощности гидроагрегатам вырабатывается в автоматическом режиме и гидроагрегаты часто работают в широком диапазоне, существенно отклоняясь от номинального режима. При этом при использовании системы управления, настроенной в номинальном режиме, качество управления открытием направляющего аппарата и управления активной мощностью и частотой значительно падает. Также при разработке используемых линейных моделей приняты допущения об отсутствии нагрузки на штоке сервомотора, хотя данная нагрузка является одной из главных составляющих сил, действующих на узел ЭГП. Кроме того, качество управления открытием направляющего аппарата может ухудшаться из-за физического износа основных элементов ЭГП. Данные, полученные на Волжской ГЭС, свидетельствуют о наличии как статических ошибок управления (в среднем 0.8 – 1.2%), так и значительных динамических ошибок управления открытием направляющего аппарата (до 15% во время пусков). Это приводит к ухудшению качества работы направляющего аппарата и, как следствие, к ухудшению характеристик контура управления активной мощности.

Повышение качества работы системы открытия направляющего аппарата возможно за счёт повышения точности управления степенью открытия направляющего аппарата в переходных и установившихся режимах с помощью адаптивной системы управления.

Данные факторы определяют целесообразность и актуальность разработки адаптивной системы автоматического управления открытием направляющего аппарата.

Работа выполнена в ходе НИР кафедры «Автоматика, электроника и вычислительная техника» по теме «Анализ и синтез систем оптимального управления технологическими процессами».

Степень разработанности темы исследования. Вопросам управления электрогидравлическими следящими системами, к которым относятся

электрогидравлические преобразователи гидроагрегатов, посвящено значительное количество работ. В современных исследованиях систем управления электрогидравлических следящих систем наблюдается отход от классической теории управления в сторону использования методов современной теории управления, нечеткой логики, нейронных сетей, робастного управления и т.д. Исследованиями в этих направлениях занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые: А.П. Карпенко, П.В. Щербачев, L. Schmidt, T.O. Andersen, H.C. Pedersen, K.S. Bikash, S. Wang, S. Liu, B. Yao, X.X.F. Li, F.P. Wijnheijmer, G.C. Vasiliu, J. Watton, M.F. Zulfatman Rahmat, L.B.Y. Song, и др. Существенный недостаток, присущий многим предложенным методам управления – это требования к априорной информации об электрогидравлической следящей системе и нагрузке, приложенной к штоку сервомотора, при этом подразумевается постоянство свойств нагрузки. Также для линейных моделей линеаризация проведена только около нулевого положения сервомотора и золотника.

Одним из возможных путей преодоления данных недостатков является использование адаптивной системы управления.

Адаптивным системам управления посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ученых: А.Л. Фрадков, Б.Р. Андриевский, А.А. Жданов, Н.Д. Егупов, И.В. Мирошник, К.Я. Astrom, Т. Haggord, D.W. Clarke, B. Yao, M. Spong и др.

Объектом исследования является система управления открытием направляющего аппарата.

Целью работы является повышение эффективности и качества работы системы открытия направляющего аппарата поворотно-лопастной турбины с помощью адаптивной системы управления.

Для достижения указанной цели в работе решены **следующие задачи:**

1. Проведен анализ существующих систем управления открытием направляющего аппарата.
2. Разработаны самообучающиеся модели главного золотника и сервомотора системы открытия направляющего аппарата для информационно-измерительной подсистемы системы адаптивного управления.
3. Разработан алгоритм формирования управляющих воздействий и расчета оптимальных настроек регулятора адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата, использующий самообучающиеся модели главного золотника и сервомотора, обращающий в минимум функционал обобщенной работы.
4. Проведено компьютерное моделирование адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата с использованием реальных экспериментальных данных.

Методы исследования. Теория автоматического управления, методы идентификации, методы оптимизации и адаптивного управления, теория систем, теория гидравлических систем.

В работе получены результаты, отличающиеся **научной новизной:**

1. Самообучающаяся математическая модель главного золотника системы открытия направляющего аппарата для информационно-

измерительной подсистемы системы адаптивного управления, отличающаяся тем, что учитывает изменение параметров во времени и уточняет их значения в процессе функционирования.

2. Самообучающаяся математическая модель сервомотора системы открытия направляющего аппарата для информационно-измерительной подсистемы системы адаптивного управления, отличающаяся тем, что представлена в виде аperiodического звена первого порядка и учитывает изменение параметров модели во времени и уточняет их значения в процессе функционирования.

3. Алгоритм формирования управляющих воздействий, отличающийся тем, что реализован в виде адаптивной системы с ПИ-регулятором, параметры которого переопределяются автоматически в реальном масштабе времени в процессе работы системы открытия направляющего аппарата с учетом изменяющихся параметров модели системы и ограничений на скорость изменения управляющих сигналов.

Достоверность исследования подтверждена математическими выводами и экспериментальными данными.

Практическая ценность состоит в выполненном синтезе адаптивной системы управления сервомотором привода лопаток направляющего аппарата, являющейся основой адаптивной системы регулирования активной мощности и частоты гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использованы:

1) в обосновании решения НТС «РусГидро» о выполнении НИОКР по разработке адаптивной системы управления гидроагрегатами с поворотными турбинами (протокол № 2/13 заседания секции «Системы технологического управления» НТС «РусГидро» от 01.11.2013 г.)

2) в научно-исследовательской работе Волжского политехнического института на кафедре «Автоматика, электроника и вычислительная техника» № 2/10-Б-13 по теме «Анализ и синтез систем оптимального управления технологическими процессами»;

3) в учебном процессе на кафедре «Автоматика, электроника и вычислительная техника» Волжского политехнического института в рамках дисциплин «Системы визуального моделирования», «Теоретические основы автоматического управления», и выполнения выпускных квалификационных работ бакалавров по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

Соответствие паспорту специальности.

Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы», а именно: пункту 1 «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем.»; пункту 5 «Методы анализа технического состояния, диагностики и идентификации информационно-измерительных и управляющих систем», пункту 6 «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-

измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на: научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Волжского политехнического института (г. Волжский 2011 - 2013); III межрегиональной конференции молодых ученых и новаторов «ИННО-КАСПИЙ» (2012), VI межрегиональной научно-практической конференции «Взаимодействие научно-исследовательских подразделений промышленных предприятий и вузов с целью повышения эффективности управления и производства» (г. Волжский 2010), конкурсе аспирантов и молодых учёных в области энергосбережения в промышленности «Эврика» (Новочеркасск 2010 г.), Международной научной конференции студентов, аспирантов, молодых учёных «Научный потенциал студенчества в XXI веке» (г. Ставрополь 2009, 2010), XIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (г. Волгоград 2009), Пятнадцатой межвузовской научно-практической конференции молодых учёных и студентов (г. Волжский), VI всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин 2009).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Самообучающаяся математическая модель главного золотника системы открытия направляющего аппарата для информационно-измерительной подсистемы системы адаптивного управления, которая учитывает изменение во времени параметров модели перемещения главного золотника и их зависимость от переменных состояния.

2. Самообучающаяся математическая модель сервомотора системы открытия лопаток направляющего аппарата для информационно-измерительной подсистемы системы адаптивного управления, которая учитывает изменение во времени параметров модели перемещения штока сервомотора и их зависимость от переменных состояния.

3. Алгоритм формирования управляющих воздействий системы управления с перенастраиваемым ПИ-регулятором, параметры которого переопределяются автоматически в реальном масштабе времени в процессе работы системы открытия направляющего аппарата.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 15 печатных работах, 5 из которых входят в список ВАК.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежит:

[1,7,8,9] – разработка моделей сервомотора и золотника, разработка алгоритма обучения модели; [2,6] – разработка системы адаптивного управления сервомоторами направляющего аппарата, [3] – разработка математической модели главного золотника и алгоритма непрерывной идентификации, [4] – разработка математической модели главного золотника и алгоритма идентификации, [5,10] – обзор методов повышения надежности измерительной информации, [11,12,13,14,15] – синтез математической модели активной мощности и математической модели электрогидравлического

преобразователя привода лопаток направляющего аппарата и привода лопастей рабочего колеса, анализ алгоритмов формирования управляющих воздействий адаптивной системы управления активной мощностью гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной.

Основные научные результаты и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе и публикациях, получены автором самостоятельно и под руководством научного руководителя.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемых источников. Общий объем диссертации 167 стр. Список используемой литературы содержит 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана существующая система открытия направляющего аппарата гидроагрегатов с поворотной-лопастной турбиной. Рассмотрены основные недостатки существующей системы управления, выявленные по экспериментальным данным, полученным на Волжской ГЭС, а также проанализированы возможные причины этих недостатков. Для улучшения качества работы системы открытия направляющего аппарата предложена адаптивная система управления.

Проведен обзор существующих моделей сервомотора и главного золотника. Рассмотрены различные методы идентификации параметров математических моделей динамических систем.

Проведен обзор различных методов и принципов синтеза систем управления, известных из теории управления. Рассмотрены современные подходы к синтезу систем управления гидравлическими сервомоторами.

Во второй главе разработаны самообучающиеся модели главного золотника и сервомотора привода лопаток направляющего аппарата. Были составлены следующие модели золотника и сервомотора: нелинейные модели и линейные модели с переменными коэффициентами, эквивалентные математическим моделям, линеаризованным вблизи опорной траектории. Разработаны алгоритмы идентификации параметров моделей сервомотора и главного золотника.

Из анализа результатов моделирования, выполненного в главе 4 с использованием экспериментальных данных, была выбрана дискретная линейная математическая модель главного золотника с переменными параметрами:

$$\begin{cases} z_{1,k} = -r_{1,k-1} \cdot z_{1,k-1} - r_{2,k-1} \cdot z_{2,k-1} - r_{3,k-1} \cdot u_{k-1} + w_{k-1} \\ z_{2,k} = z_{1,k-1} \\ x_k = z_{1,k} + v_k \end{cases}, \quad (1)$$

где $r_{1,k-1}, r_{2,k-1}, r_{3,k-1}$ - параметры дискретной модели главного золотника в k -й момент времени, подлежащие идентификации, $z_{1,k} = x_k$ - положение золотника в k -й момент времени, u_k - управляющее воздействие в k -й момент времени, w_k - неизвестное возмущающее воздействие в k -й момент времени, v_k - погрешность измерения (шум измерения) в k -й момент времени.

Для идентификации параметров математической модели золотника была составлена линейная математическая модель главного золотника в расширенном пространстве состояний:

$$\begin{cases} L_k = A_{k-1}L_{k-1} + Gw_{k-1} \\ x_k = HL_k + v_k \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{где } L_k = (L_{1,k} \ L_{2,k} \ L_{3,k} \ L_{4,k} \ L_{5,k})^T = (z_{1,k} \ z_{2,k} \ r_{1,k} \ r_{2,k} \ r_{3,k})^T, \\ A_k = \begin{pmatrix} -L_{3,k} & -L_{4,k} & -L_{1,k} & -L_{2,k} & u_k \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G = H^T = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T.$$

В качестве критерия обучения был принят квадратичный критерий:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot (x_0 - \hat{x}_0)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_0^{k_f} \left\{ \gamma_1 \cdot (x_k - \hat{x}_k)^2 + \gamma_2 \cdot (w_k)^2 \right\}, \quad (3)$$

где $\beta, \gamma_1, \gamma_2$ - весовые коэффициенты, $\hat{x}_k = H\hat{L}_k$ - оценка положения штока золотника по модели, k_f - конечный момент времени оптимизационного процесса.

Задача идентификации параметров модели главного золотника сводится к условной минимизации функционала (3) с ограничениями (2). Решение указанной задачи приводит к двухточечной краевой задаче, из решения которой методом инвариантного погружения получен следующий алгоритм идентификации:

$$\begin{cases} \hat{L}_k = A_{k-1} \cdot \hat{L}_{k-1} + P_{x,k} \cdot H^T \cdot \gamma_1 \cdot (x_{k-1} - H \cdot \hat{L}_{k-1}) \\ P_{x,k}^a = G \cdot \gamma_2 \cdot G^T + A_{k-1} \cdot P_{x,k-1} \cdot A_{k-1}^T \\ P_{x,k} = P_{x,k}^a - P_{x,k}^a \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{x,k}^a \cdot H^T + \gamma_1)^{-1} \cdot H \cdot P_{x,k}^a \end{cases}, \quad (4)$$

с начальными условиями

$$L_0 = (L_{1,0} \ L_{2,0} \ r_{1,мнк} \ r_{2,мнк} \ r_{3,мнк})^T, \quad P_{x,0} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix},$$

где $P_{x,k}$ - дисперсия оценивания переменных состояния, σ_n^2 - дисперсия ошибки задания начальных условий для n -ой переменной состояния, $P_{x,k}^a$ - вспомогательная матрица (априорная дисперсия оценивания), $r_{1мнк}, r_{2мнк}, r_{3мнк}$ - предварительные оценки параметров модели, полученные одношаговым методом наименьших квадратов.

Модель (2) совместно с алгоритмом непрерывной идентификации (4) представляет собой самообучающуюся математическую модель главного золотника, которая является одним из положений, выносимых на защиту.

Из анализа результатов моделирования, выполненного в главе 4 с использованием экспериментальных данных, была выбрана дискретная линейная математическая модель сервомотора в виде инерционного звена первого порядка с переменными параметрами:

$$\begin{cases} Y_k = F_{k-1} \cdot Y_{k-1} + B_{k-1} \cdot x_{k-1} + G \cdot w_{y,k-1} \\ y_k = H \cdot Y_k + v_{y,k} \end{cases},$$

где x_k - положение главного золотника в k -й момент времени, $Y_k = y_k$ - положения штока сервомотора в k -й момент времени, $w_{y,k}$ - возмущающее воздействие процесса в k -й момент времени, $F_k = a_{1,k}, B_k = a_{2,k}$ - параметры модели в k -й момент времени, $G^T = H = 1$ - вектор коэффициентов возмущающего воздействия и вектор наблюдения.

Для идентификации параметров математической модели сервомотора была составлена линейная математическая модель в расширенном пространстве состояний:

$$\begin{cases} S_k = A_{y,k-1} S_{k-1} + G_y w_{y,k-1} \\ y_k = H_y S_k + v_{y,k} \end{cases}, \quad (5)$$

где

$$S_k = (S_{1,k} \quad S_{2,k} \quad S_{3,k})^T = (y_k \quad a_{1,k} \quad a_{2,k})^T,$$

$$A_{y,k} = \begin{pmatrix} S_{2,k} & S_{1,k} & x_k \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G_y^T = H_y = (1 \quad 0 \quad 0).$$

В качестве критерия обучения модели сервомотора был принят квадратичный критерий, аналогичный критерию для модели золотника:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (y_0 - \hat{y}_0)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_0^{k_f} \left\{ \varphi_1 \cdot (y_k - \hat{y}_k)^2 + \varphi_2 \cdot (w_{y,k})^2 \right\}, \quad (6)$$

где $\rho, \varphi_1, \varphi_2$ - весовые коэффициенты, $\hat{y}_k = H_y \hat{S}_k$ - оценка положения штока золотника по модели, k_f - конечный момент времени оптимизационного процесса.

Задача идентификации параметров модели штока сервомотора сводится к условной минимизации функционала (6) с ограничениями (5). Решение указанной задачи приводит к двухточечной краевой задаче, из решения которой методом инвариантного погружения получен следующий алгоритм идентификации:

$$\begin{cases} \hat{S}_k = A_{y,k-1} \cdot \hat{S}_{k-1} + P_{y,k} \cdot H_y^T \cdot \varphi_1 \cdot (y_{k-1} - H_y \cdot \hat{S}_{k-1}) \\ P_{y,k}^a = G_y \cdot \varphi_2 \cdot G_y^T + A_{y,k-1} \cdot P_{y,k-1} \cdot A_{y,k-1}^T \\ P_{y,k} = P_{y,k}^a - P_{y,k}^a \cdot H_y^T \cdot (H_y \cdot P_{y,k}^a \cdot H_y^T + \varphi_1)^{-1} \cdot H_y \cdot P_{y,k}^a \end{cases} \quad (7)$$

с начальными условиями

$$S_0 = (y_0 \quad a_{1_мнк} \quad a_{2_мнк})^T, P_{y,0} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}$$

где $P_{y,k}$ - дисперсия оценивания переменных состояния, σ_n^2 - дисперсия ошибки задания начальных условий для n -ой переменной состояния, $P_{y,k}^a$ - вспомогательная переменная (априорная дисперсия оценивания), $a_{1_мнк}, a_{2_мнк}$ - предварительные оценки параметров модели, полученные одношаговым методом наименьших квадратов.

Модель (5) совместно с алгоритмом непрерывной идентификации (7) представляет собой самообучающуюся математическую модель сервомотора, которая является одним из положений, выносимых на защиту.

Таким образом, во 2-ей главе разработаны самообучающиеся математические модели в пространстве состояний главного золотника и сервомотора привода лопаток направляющего аппарата, решена задача идентификации в реальном масштабе времени математических моделей главного золотника и сервомотора в контуре обратной связи по результатам измерений.

В третьей главе для повышения эффективности управления открытием направляющего аппарата была предложена адаптивная система управления. В качестве альтернативной системы управления предложена каскадная адаптивная система управления открытием направляющего аппарата. Исходя из анализа результатов моделирования одноконтурной и каскадной адаптивных систем управления открытием направляющего аппарата, представленных в главе 4, была выбрана одноконтурная система управления.

Одноконтурная адаптивная система управления открытием направляющего аппарата показана на рисунке 1.

Была составлена математическая модель системы управления открытием направляющего аппарата в пространстве состояний в матричном виде:

$$\begin{cases} L_{u,k} = F_{u,k-1}L_{u,k-1} + G_{u,k-1}\Psi_{k-1} \\ y_k = H_u L_{u,k} \end{cases}, \quad (8)$$

где $L_{u,k}$ - вектор переменных состояния системы управления:

$$L_{u,k} = (y_k \quad z_{1,k} \quad z_{2,k} \quad q_k)^T,$$

q_k - дискретный интегратор ПИ регулятора, Ψ_k - вектор управляющих воздействий:

$$\Psi_k = \begin{pmatrix} \Psi_{1,k} \\ \Psi_{2,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Kn_k \cdot e_k \\ Ku_k \cdot e_k \end{pmatrix},$$

$F_{u,k}$, $G_{u,k}$, H_u - матрицы при переменных состояния, управляющих воздействиях и вектор наблюдений:

$$F_{u,k} = \begin{pmatrix} a_{1,k} & a_{2,k} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{1,k} & -r_{2,k} & -r_{3,k} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, G_{u,k} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ b_{3,k} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, H_u = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0).$$

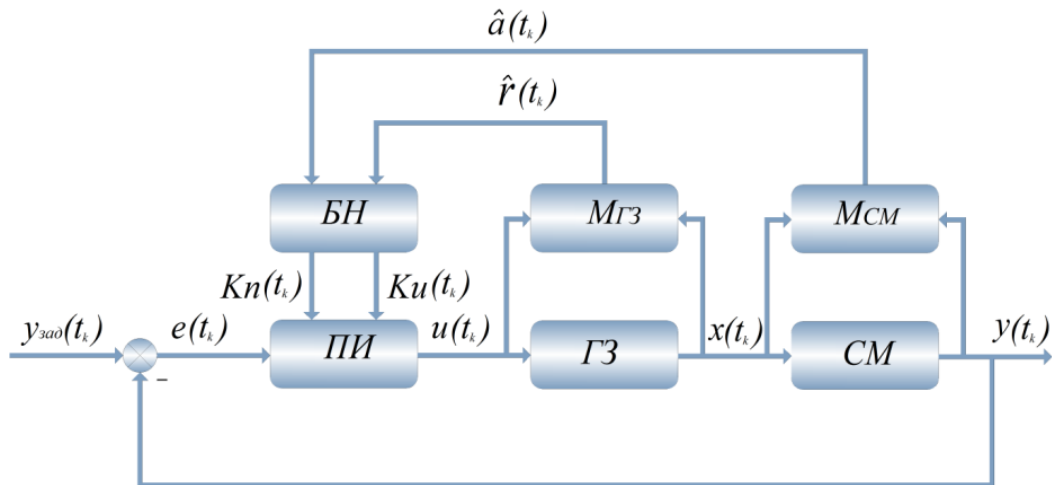


Рисунок 1 - Адаптивная система управления открытием направляющего режима

$ГЗ$ – главный золотник, $СМ$ – сервомотор, $ПИ$ – ПИ регулятор, $БН$ – блок настройки регулятора, $МГЗ$ и $МСМ$ - самообучающиеся математические модели главного золотника и сервомотора, $y_{зад}(t_k)$ - заданное значение положения штока сервомотора, $y(t_k)$ - положение штока сервомотора (измеренное), $u(t_k)$ - управляющий сигнал, $x(t_k)$ - положение штока главного золотника (измеренное), $e(t_k)$ - ошибка регулирования положения штока сервомотора, $\hat{a}(t_k)$, $\hat{r}(t_k)$ - вектора оценки параметров математических моделей сервомотора и главного золотника, $Kn(t_k)$ - коэффициент пропорциональной части ПИ регулятора, $Ku(t_k)$ - коэффициент интегральной части регулятора.

В качестве критерия качества управления был выбран следующий функционал:

$$J_u = \frac{1}{2k_f} \sum_0^{k_f} \left[(y_{зад,k} - H_u L_{u,k})^2 + \alpha (\Psi_{1,k}^2 + \Psi_{2,k}^2) \right], \quad (9)$$

где k_f - конечное время оптимизации, $y_{зад,k}$ - сигнал задания положения штока сервомотора (уставка), α - параметр регуляризации ($0 < \alpha \leq 1$).

Путем условной минимизации функционала (9) с ограничениями (8) с помощью дискретного принципа максимума и метода инвариантного погружения, получен следующий алгоритм формирования управляющих воздействий (10) и перенастройки параметров ПИ регулятора (11):

$$\begin{cases} L_{u,k} = F_{u,k-1} L_{u,k-1} + \Lambda_{k-1} H_u^T (y_{зад,k-1} - H_u L_{u,k-1}) \\ \Lambda_k = F_{u,k-1} \Lambda_{k-1} + \Lambda_{k-1} F_{u,k-1}^T - \Lambda_{k-1} H_u^T H_u \Lambda_{k-1} + \alpha^{-1} G_{u,k-1} G_{u,k-1}^T \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} Kn_k \\ Ku_k \end{pmatrix} = (G_{u,k}^T G_{u,k})^{-1} G_{u,k}^T \Lambda_k H_u^T. \quad (11)$$

Таким образом, в 3 главе была предложена адаптивная система управления открытием направляющего аппарата. Система представляет собой одноконтурную систему управления с ПИ регулятором положения штока сервомотора с перенастраиваемыми параметрами. Была разработана математическая модель одноконтурной системы управления открытием направляющего аппарата с ПИ регулятором в пространстве состояний. С помощью принципа максимума и метода инвариантного погружения был найден алгоритм формирования управляющих воздействий и перенастройки параметров регулятора.

В четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования процессов непрерывной идентификации математических моделей главного золотника и сервомотора системы открытия направляющего аппарата гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной, а также результаты компьютерного моделирования работы одноконтурной и каскадной адаптивных систем управления открытием направляющего аппарата.

Для исследования адекватности выбранных линейных математических моделей с переменными параметрами были проведено компьютерное моделирование с использованием реальных данных, записанных во время работы различных гидроагрегатов Волжской ГЭС. Моделирование было проведено для 28 наборов экспериментальных данных. Результаты моделирования приведены в таблице 1.

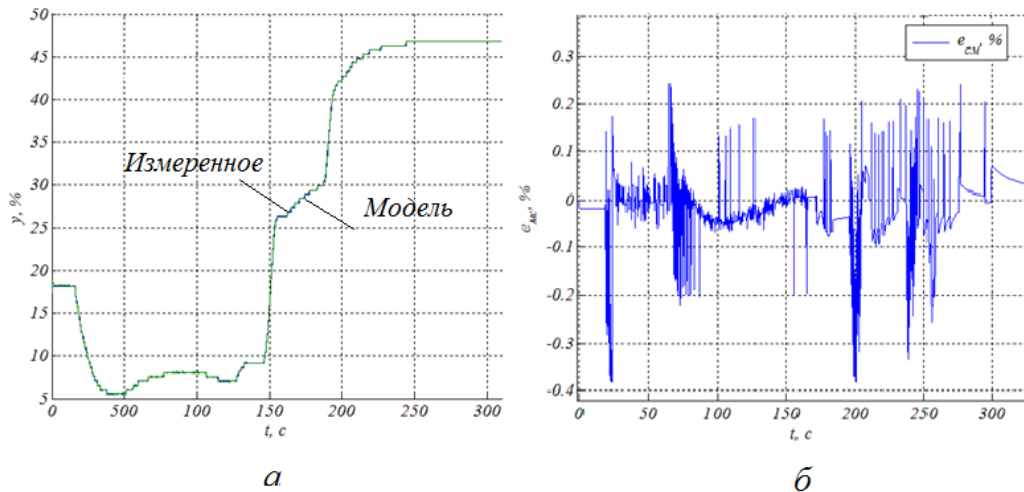


Рисунок 2 – Результаты моделирования открытия направляющего аппарата (а – измеренные значения открытия и полученные моделированием, б – сигнал невязки)

На рисунке 2 показан результат моделирования перемещения штока сервомотора, а также сигнал невязки.

Таблица 1 – Результаты моделирования непрерывной идентификации параметров моделей

Модель	Показатель качества идентификации	Минимальное по модулю значение, %	Максимальное по модулю значение, %	Среднее значение, %
Золотник	Среднее сигнала невязки $\bar{e}_{мз}$	< 0.1	0.5	< 0.1
	Стандартное отклонение невязки S_x	0.1	2.8	0.6
	Максимальное значение невязки $\max e_{мз} $	0.4	7.3	2.8
Сервомотор	Среднее сигнала невязки $\bar{e}_{см}$	< 0.1	0.2	< 0.1
	Стандартное отклонение невязки S_y	< 0.1	1.2	0.4
	Максимальное значение невязки $\max e_{см} $	0.5	6.8	3.5

Для исследования эффективности адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата было проведено компьютерное моделирование с использованием экспериментальных данных и оценок параметров математических моделей главного золотника и сервомотора. Моделирование адаптивной системы управления было проведено также для 28 наборов экспериментальных данных. Результат моделирования одноконтурной адаптивной системы управления (ОАСУ) открытием направляющего аппарата представлен в таблице 2. Также в таблице 2 представлены показатели качества

управления открытием направляющего аппарата, реализованного штатной системой управления (ШСУ).

Таблица 2 - Результаты моделирования одноконтурной адаптивной системы управления

	ОАСУ	ШСУ
Среднее рассогласование \bar{e}	< 0.1 %	0.8 %
Стандартное отклонение рассогласования s_e	0.3 %	2.1 %
Максимальное рассогласование $\max e $	1.2%	22.7%
Перерегулирование τ_y	1.1%	13%

На рисунке 3 показан результат моделирования управления открытием направляющим аппаратом, а также сигнал рассогласования.

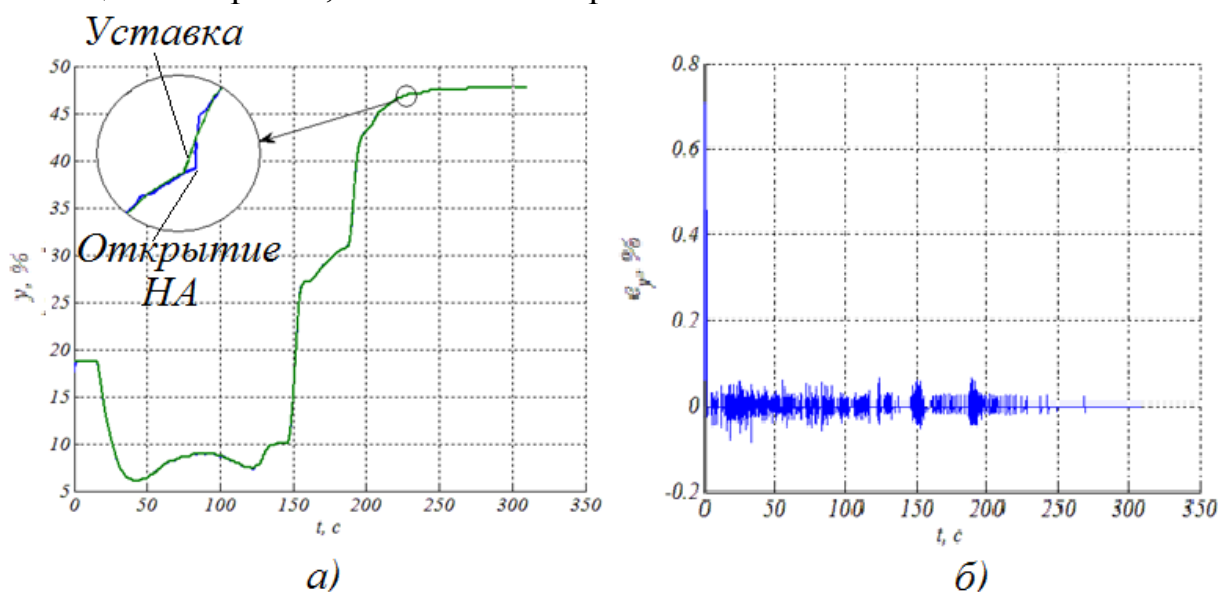


Рисунок 3 – Результаты моделирования адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата (а) – уставка значения открытия и открытие, реализованное моделированием адаптивной системы управления, б) – сигнал рассогласования)

Также было выяснено, что каскадная система управления дает результаты, сравнимые по точности управления открытием направляющего аппарата с одноконтурной адаптивной системой управления и позволяет снизить колебательные движения главного золотника, что может снизить износ золотника. Однако было выяснено, что каскадная адаптивная система управления в некоторых случаях теряла устойчивость. Эта проблема решалась путем варьирования параметров регуляризации, что, однако, не подходит для работы системы в оперативном режиме в реальном времени.

Таким образом, было проведено компьютерное моделирование с использованием реальных экспериментальных данных, которое подтвердило

эффективность разработанных математических моделей, алгоритмов идентификации, алгоритма формирования управляющих воздействий и перенастройки параметров регулятора в реальном времени.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в работе. Разработана адаптивная система управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной. Моделирование показало, что система управления уменьшает перерегулирование открытия направляющего аппарата с 13% до 1.1% по сравнению с штатной системой управления при существующих технических средствах. Также средняя ошибка управления становится меньше 0.1% (в штатной системе 0.8%), стандартное отклонение ошибки снижается с 2.1% до 0.3%.

Таким образом, разработанная адаптивная система управления позволяет повысить качество управления открытием направляющего аппарата и как следствие качество управления частотой и активной мощностью гидроагрегата.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны самообучающиеся нелинейные и линейные математические модели с переменными параметрами в пространстве состояний главного золотника и сервомотора системы открытия направляющего аппарата, использующие текущую измерительную информацию для идентификации параметров.

2. На базе самообучающихся линейных математических моделей главного золотника и сервомотора, функционала обобщённой работы разработан алгоритм формирования управляющих воздействий адаптивной системы автоматического управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной.

3. Проведено компьютерное моделирование работы адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата на ЭВМ, которое подтвердило работоспособность разработанных алгоритмов. Ошибка управления открытием направляющего аппарата не превышает 1.2% при практически нулевом среднем значении.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Браганец, С.А. Разработка математической модели сервомотора направляющего аппарата гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной / А.С. Гольцов, С.А. Браганец, А.В. Савчиц, // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 10. – с. 10 – 13.

2. Браганец, С.А. Система адаптивного управления и диагностики сервомоторов направляющего аппарата гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной [Электронный ресурс] /С.А. Браганец, А.С. Гольцов, А.В. Савчиц // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1807> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Браганец, С.А. Идентификация математической модели главного золотника для системы диагностики и адаптивного управления открытием направляющего аппарата [Электронный ресурс] /С.А. Браганец, А.С. Гольцов, А.В. Савчиц // «Инженерный вестник Дона», 2013, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1906> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Браганец, С.А. Система диагностики технического состояния главного золотника и сервомотора электрогидравлического преобразователя системы управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата Волжской ГЭС [Электронный ресурс] /С.А. Браганец, А.С. Гольцов, А.В. Савчиц // «Инженерный вестник Дона», 2013, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1912> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Браганец, С.А. Повышение надёжности измерительной информации / С.А. Браганец, А.В. Савчиц, Б.Г. Севастьянов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 2. – с. 46 – 49.

Статьи, свидетельства, материалы конференций и учебные пособия:

6. Braganets S.A., Goltsov A.S., Savchits A.V. Adaptive control and diagnosis of Kaplan turbine wicket gate adjusting system// 1st Conference “Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings”: papers of the 1st International Scientific Conference (June 29, 2013). Cibunet Publishing. New York, USA. - 2013. - 234 p.
7. Браганец, С.А. Разработка и исследование математической модели электрогидравлического преобразователя для адаптивной системы управления разворотом лопастей рабочего колеса гидроагрегата Волжской ГЭС [Электронный ресурс] / Браганец С.А., Гольцов А.С. // 11-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 27-28 янв. 2012 г.) : сб. матер. конф. / ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 8-10.
8. Гольцов, А.С. Разработка математической модели сервомотора для систем диагностики и управления направляющим аппаратом гидротурбины / Гольцов А.С., Браганец С.А., Савчиц А.В.// Электронный сборник тезисов докладов III межрегиональной конференции молодых ученых и инноваторов «ИННО-КАСПИЙ» (г. Астрахань, 16-21 апреля 2012 г.)/ АГТУ, 2012.
9. Браганец, С.А. Математическая модель сервомотора направляющего аппарата гидротурбины / Браганец С.А., Савчиц А.В., Гольцов А.С. // Сборник тезисов научно-практической конференции молодых ученых по направлению: Химия – наука будущего. Инновации в энергосбережении и энергоэффективности. Информационные технологии – локомотив инновационного развития: в рамках молодёжного конгресса "Интеграция инноваций: региональные аспекты", 19-21 апр. 2012 г. / ВПИ (филиал) ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2012. - С. 33-35.

10. Браганец С.А. Повышение надежности получаемой измерительной информации / С.А. Браганец, А.В. Савчиц, Б.Г. Севастьянов // Молодой учёный. – 2010. – № 11, т. I. – с. 59 – 61.

11. Браганец, С.А. Адаптивная система автоматического пуска гидроагрегата с поворотной-лопастной гидротурбиной / А.С. Гольцов, А.А. Силаев, С.А. Браганец // Сборник научно-исследовательских работ финалистов конкурса аспирантов и молодых учёных в области энергосбережения в промышленности (Новочеркасск, октябрь 2010 г.) / Южно-Российский гос. техн. ун-т (Новочеркасский политехн. ин-т). - Новочеркасск, 2010. - С. 25-29.

12. Браганец, С. А. Исследование системы адаптивного управления частотой и активной мощностью гидроагрегата Волжской ГЭС / С.А. Браганец, Т.С. Сложеникина, О.А. Барилловская, А.С. Гольцов // Взаимодействие научно-исследовательских подразделений промышленных предприятий и вузов с целью повышения эффективности управления и производства: сборник трудов VI межрегиональной научно-практической конференции, г. Волжский, 18-19 мая 2010 г / ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волжский, 2010. - С. 159-160. - www.volpi.ru/files/science/science_conference.

13. Браганец, С.А. Разработка и анализ обучаемой модели подсистемы разворота лопастей рабочего колеса гидротурбины / Браганец С.А., Сложеникина Т.С., Барилловская О.А., Гольцов А.С. // Инновационные технологии в обучении и производстве : матер. VI всерос. науч.-практ. конф., г. Камышин, 15-16 дек. 2009 г. В 6 т. Т. 2 / ГОУ ВПО ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - С. 28-29.

14. Браганец, С.А. Моделирование адаптивной системы управления гидроагрегатами Волжской ГЭС / Браганец С.А., Сложеникина Т.С., Гольцов А.С. // Пятнадцатая межвузовская науч.-практ. конф. молодых учёных и студентов, 25-29 мая 2009 г. : тез. докл. : в 4 т. Т. 1 / Филиал ГОУ ВПО "МЭИ (ТУ)" в г. Волжском [и др.]. - Волжский, 2009. - С. 26-27.

15. Браганец, С.А. Моделирование адаптивной системы управления гидроагрегатами Волжской ГЭС / Барилловская О.А., Браганец С.А., Сайфулин В.Г., Сложеникина Т.С., Гольцов А.С. // Научный потенциал студенчества в XXI веке : матер. III междунар. науч. студенческой конф. Т. 1 : Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки / ГОУ ВПО "Северо-Кавказ. гос. техн. ун-т" [и др.]. - Ставрополь, 2009. - С. 259.

Подписано в печать _____ . Формат 60x84 1/16.

Усл. п. л. 1,0. Печать офсетная. Бумага офсетная. Типография РПК «Политехник» Волгоградского государственного технического университета. 400005, Волгоград, ул. Советская, 35. Заказ № _____. Тираж экз.