

На правах рукописи



**Ульянов Александр Дмитриевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Братск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Братский государственный университет»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук,  
профессор кафедры Управление в  
технических системах ФГБОУ ВО  
«Братский государственный  
университет»

**Лузгин Владимир Васильевич**

**Официальные оппоненты:**

**Воевода Александр Александрович -**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры Автоматики Новосибирского  
государственного технического  
университета

**Авсиевич Александр Викторович -**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры Мехатроники, автоматизации  
и управления на транспорте  
Самарского государственного  
университета путей сообщения

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный технический  
университет»

Защита состоится «22» октября 2020 г. в 15 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д. 212.268.02, созданного на базе Томского государственного систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/uai7uzwl>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Решение триединой задачи идентификации, управления и диагностирования промышленных объектов (ПО) с учетом явлений запаздывания, нестационарности и нелинейности ПО при комплексной автоматизации технологических процессов – необходимое условие обеспечения безопасности, конкурентоспособности и надежности производства.

В современных системах автоматического управления перспективным является управление, в котором управляющие воздействия служат для обеспечения требуемого качества функционирования ПО с учетом непрерывной идентификации и диагностики объектов управления в режиме их нормального функционирования.

Процесс идентификации позволяет решить две задачи – обеспечение требуемого качества управления ПО и получение информации о его техническом состоянии.

Идентификация и диагностика ПО имеют свои специфические особенности, которые и выделяют их как самостоятельные области исследований. Процесс идентификации ПО является необходимым этапом при решении задач их синтеза и диагностики, причем при синтезе ПО допустимы, а порой необходимы различного рода приближения, направленные на упрощение математических моделей с целью получения конструктивного результата. Точность идентификации всецело определяет глубину и достоверность диагноза ПО, поэтому процесс идентификации ПО является основополагающим при разработке алгоритмов диагностирования.

**Степень её разработанности:** теоретические обоснования идентификации динамики технических объектов и систем приведены в работах В.А. Бесекерского, М.В. Келдыша, М.А. Лаврентьева, Г.И. Марчука, Б.Н. Петрова, Е.П. Попова, Н.С. Райбмана, В.В. Солодовникова, А.Н. Тихонова, Я.З. Цыпкина, П. Эйкхоффа, Л. Льюнга, П. Дж. Хьюбера и других ученых. Весомый вклад в становление и развитие технической диагностики сложных ПО как науки внесли ученые: И.А. Биргер, Д.В. Гаскаров, А.В. Мозгалевский, П.П. Пархоменко, И.М. Синдеев, Е.С. Согомоян и др.

В настоящее время, по мнению отечественных и зарубежных ученых, исследования процессов контроля и диагностики соответствуют переходному этапу от частичной к полной автоматизации этих процессов. Поэтому, наряду с созданием специализированных стендов для диагностирования ПО, необходимым является решение задач по разработке информационных технологий системного анализа диагностической информации, что позволит существенно повысить глубину и точность формируемого диагноза при одновременном снижении трудоемкости.

Разработанные прикладные методы и алгоритмы идентификации и диагностирования ПО апробированы на реальных механических, электрических и электромеханических ПО.

**Объектом исследования** являются электрические и механические промышленные объекты.

**Предметом исследований** является техническое состояние механических и электрических промышленных объектов.

**Цель диссертационной работы** заключается в формировании автоматической системы диагностирования колебательных ПО с запаздыванием и исследовании методов идентификации инерционных механических, электрических и электромеханических ПО, а также в разработке и исследовании резонансных методов диагностирования колебательных ПО.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо разработать:

- прикладные методы и алгоритмы идентификации промышленных объектов с учетом транспортного запаздывания, позволяющие получить требуемую точность полученных моделей, для проведения дальнейшей диагностики;

- инженерный метод расчета погрешностей в определении структурных параметров промышленных объектов с учетом транспортного запаздывания;

- прикладные резонансные методы диагностирования электрических и механических колебательных промышленных объектов;

- автоматическую систему диагностирования колебательных промышленных объектов.

**Научная новизна работы** заключается в разработке методов структурной и параметрической идентификаций инерционных ПО с учетом транспортного запаздывания, позволяющих увеличить точность идентификации за счет более качественного определения структурных параметров ПО; в разработке метода резонансного диагностирования, который позволяет определить структурные параметры колебательных ПО в процессе их нормального функционирования или стендовых испытаний; в разработке и внедрении автоматические системы диагностирования колебательных ПО.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.**

Предложена методологическая основа диагностирования ПО с запаздыванием. Для диагностирования колебательных ПО с запаздыванием разработан резонансный метод, который позволяет проводить диагностику ПО в процессе их нормального функционирования или стендовых испытаний. Использование метода пробных подключений дает возможность сформировать систему нелинейных алгебраических уравнений и на основании эвристического анализа множества решений этой системы определить структурные параметры ПО.

Разработан алгоритм идентификации на основе программного обеспечения MatLab. Который допускает использование любого управляющего воздействия для проведения идентификации объекта исследований. Применение разработанного алгоритма позволяет увеличить точность в процессе решений

задач идентификации и диагностики колебательных ПО с учетом транспортного запаздывания.

Предложена автоматическая система диагностирования и мониторинга колебательных ПО, реализующая разработанные методы идентификации и диагностирования.

**Методология и методы исследования поставленных задач.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы: математического моделирования, теории автоматического управления, теории дифференциальных уравнений, технической диагностики, структурной и параметрической идентификаций, вычислительной математики, натуральных и вычислительных экспериментов. Для проведения вычислительных экспериментов использовались программы: MicrosoftExcel, MatLab 2015, Time-DelayId v. 1.00, VtorId v. 1.00.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- методы и алгоритмы вторичной идентификации, позволяющие повысить точность идентификации динамики ПО и достоверность диагноза состояния ПО;
- метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, а также метод пробных подключений, позволяющие оперативно определять величины тех структурных параметров ПО, которые имеют определённую диагностическую ценность;
- резонансные методы диагностирования, их практическое применение для электрических, механических и электромеханических ПО;
- автоматическая система диагностирования и мониторинга колебательных ПО.

**Степень достоверности научных результатов** подтверждена экспериментальными данными, полученными в ходе исследований в производственных и лабораторных условиях, математически и физически обоснованными моделями динамики ПО, вычислительными экспериментами, интегральной оценкой степени идентичности динамических характеристик реальных ПО и их моделей.

**Практическая значимость результатов** диссертации заключается в том, что они позволяют существенно увеличить глубину и достоверность формируемого диагноза, а также использовать полученную информацию для прогнозирования постепенных отказов. Разработанные методы идентификации и диагностирования дают возможность определять такие параметры ПО, которые не могут быть измерены непосредственно или для определения которых требуется проводить дорогостоящие и трудоемкие эксперименты. Результаты диссертационных исследований позволяют определять диагностическую ценность только исходных математических моделей объектов диагностики, но и алгоритмов их диагностирования, а также существенно увеличить глубину и достоверность формируемого диагноза. Основные результаты работы подтверждены актами внедрения в производственный процесс. Разработанная

автоматическая система диагностирования промышленных объектов зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 9 международных и всероссийских конференциях : международной научно-практической конференции «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM» (г. Пенза 2014 г.); всероссийской научно-технической конференции «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (г. Братск 2013-2019 гг.); научной студенческой конференции МНСК-2014 (г. Новосибирск).

**Публикации.** Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 20 научных работах, из них 5 в реферируемых журналах из перечня ВАК РФ, статья в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus. Издана монография. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы получены лично автором. К ним относятся: разработка прикладного метода и алгоритма вторичной идентификации ПО с учетом запаздывания; способ определения критерия устойчивости систем автоматического регулирования ПО; метода решения систем нелинейных алгебраических уравнений. В соавторстве с научным руководителем был разработан и апробирован метод резонансного диагностирования колебательных промышленных объектов, а также в соавторстве с преподавателями кафедры была разработана система автоматического диагностирования промышленных объектов.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 132 наименования, 3 приложений. Общий объем основной части составляет 134 страницы машинописного текста и включает 41 рисунок и 7 таблиц. В приложениях приведены документы, свидетельствующие об использовании результатов исследований, и свидетельства о регистрации разработанных программных средств.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность, раскрыто основное содержание работы.

**В первой главе** дан обзор методов идентификации и диагностирования, приводится общая постановка задачи идентификации и диагностирования ПО, представлены классификации методов идентификации ПО и моделей и методов диагностирования ПО.

Процесс идентификации промышленных объектов можно разделить на два этапа, первым из которых является структурная идентификация, вторым – параметрическая идентификация.

В ходе решения задачи структурной идентификации необходимо определить класс уравнений и структуру математической модели исследуемого объекта.

На втором этапе идентификации ПО необходимо разработать алгоритмы определения структурных параметров. Задача параметрической идентификации заключается в определении числовых значений структурных параметров модели, при которых значения математической модели максимально соответствуют экспериментальным данным исследуемого ПО и его откликам.

Задача диагностирования ПО сводится к частному решению задачи параметрической идентификации, в том случае если полученные значения определяют техническое состояние ПО.

Отличия решений математических моделей расчётных переходных характеристик от экспериментальных переходных функций можно оценить величиной интегральной ошибки  $I$ . При этом численного решения может и не существовать, если нарушается хотя бы одно условие постановки данной задачи по Адамару (условия разрешимости, однозначности и устойчивости).

Задачу идентификации можно назвать некорректной, т.к. всегда будет присутствовать некоторая ошибка ( $I \neq 0$ ). Для задач, рассматриваемых в диссертации общая постановка задачи идентификации и диагностики ПО будет являться конструктивной.

Современные ПО, представляющие собой сложную динамическую систему, могут состоять из элементов различной природы (механических, электрических, электромеханических и т. д.). Каждый из рассматриваемых элементов может иметь различные особенности, но всегда в них будет присутствовать составляющая запаздывания выходного сигнала по отношению к входному. Поэтому для увеличения достоверности поставленного диагноза технического состояния ПО необходимо выбирать соответствующие методы диагностирования. При реализации задачи диагностирования целесообразно использование детерминированных методов диагностики, так как они полностью удовлетворяют поставленным целям диагностики: простота, корректность, универсальность.

**Во второй главе** проведен анализ методов идентификации промышленных объектов, влияния запаздывания на результат идентификации, разработан и апробирован метод вторичной идентификации.

Целью вторичной идентификации является минимизация значения целевой функции, которая определяется посредством уточнения значений структурных параметров ПО. Диапазон и шаг квантования структурных параметров может быть определен в ходе структурной и параметрической идентификации исследуемого ПО.

Определение ошибки идентификации осуществляется суммарной абсолютной погрешностью

$$S_m = \sum_{i=1}^n |h_p(t_i) - h_s(t_i)| \rightarrow \min,$$

где  $h_p$  – значение передаточной функции, полученное расчетным путем,  $h_э$  – значение передаточной функции, полученное экспериментальным путем,  $t$  – время.

В ходе проведения вторичной идентификации определяются оптимальные значения коэффициентов и интегральная ошибка.

Апробация метода вторичной идентификации была проведена на различных ПО: процесс разгона гидрогенератора Братской ГЭС со сложным управляющим воздействием, динамика линейной стационарной системы автоматического регулирования (САР) скорости двигателя постоянного тока.

На Братской ГЭС введена в эксплуатацию автоматическая система регулирования частоты вращения турбины и диагностики гидроагрегатов, имеется база данных измерений. Исходная информация (рис.1) является достаточной для идентификации динамики гидрогенераторов в режиме нормального функционирования.

Следует отметить, что процесс пуска гидроагрегата осуществляется посредством сложного управляющего воздействия(рис. 2).

В результате структурной идентификации получена передаточная функция (Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем.- СПб., 2001.- 388 с):

$$W_1(p) = \frac{e^{-\tau p}}{Tp+1}.$$

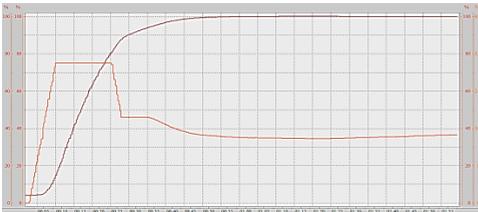


Рис. 1. Экспериментальная переходная характеристика разгона гидрогенератора

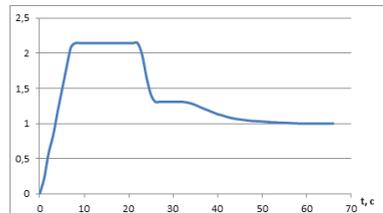


Рис. 2. График управляющего воздействия

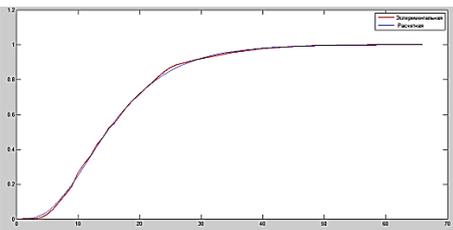


Рис. 3. График идентификации процесса разгона гидрогенератора  $W_1(p)$

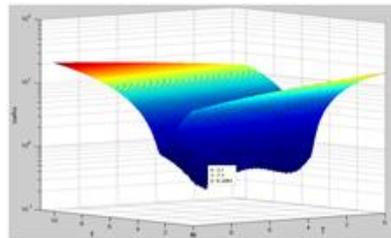


Рис. 4 График зависимости погрешности идентификации от коэффициентов передаточной функций  $W_1(p)$

В ходе проведения параметрической идентификации были определены постоянные времени разными методами:

- звеном первого порядка с запаздыванием  $T = 14$  с,  $\tau = 6,5$  с, ошибка идентификации составила 23%,

- методом интегральных площадей  $T = 20.5$  с,  $\tau = 6,5$  с, ошибка идентификации составила 17%,

- методом  $n$ -го порядка (метод Стрейца) для объекта первого порядка  $T=40$  с,  $\tau = 6,5$  с, ошибка идентификации составила 4.82%.

Операторное изображение может быть представлено разложением в ряд Маклорена, т. е.

$$e^{-\tau p} = \frac{1}{1 + \frac{\tau p}{1!} + \frac{(\tau p)^2}{2!} + \dots}$$

Очевидно, что ряд имеет неограниченную степень. Для нахождения аналитического решения полученной переходной характеристики можно ограничиться несколькими членами ряда. Процесс определения необходимого количества членов ряда Маклорена осуществляется посредством метода вторичной идентификации. При замене ряда Маклорена тремя его членами, дальнейшее увеличение числа членов ряда практически не влияет на погрешность идентификации, была получена передаточная функция

$$W_1(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1) \left( \tau_1 p + \frac{(\tau_1 p)^2}{2} + 1 \right)}.$$

Ошибка идентификации при управляющем воздействии (рис. 2) составила 0,29% для  $W_1(p)$  (рис. 3).

На рис.4 представлен график зависимостей погрешностей идентификации от коэффициентов передаточной функций  $W_1(p)$ , где каждой паре структурных параметров соответствует погрешность идентификации. При расчете или экспериментальном определении структурных параметров  $T_1$ ,  $\tau_1$ , можно непосредственно по рис.4 определить интегральную ошибку идентификации.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При разгоне гидрогенератора присутствует чистое (транспортное) запаздывание, которое обозначается функцией  $e^{-\tau p}$ . Если данную функцию представить в виде разложения в ряд Маклорена или в ряд Фурье, то будет получено большое разнообразие передаточных функций.

2. Разработанный метод идентификации позволяет учитывать любое управляющее воздействие и получать минимальную ошибку идентификации.

3. Предложенный метод позволяет учесть изменения времени запаздывания  $\tau$  от технического состояния диагностируемого объекта. В результате применения данного метода может быть получена передаточная функция любой сложности, коэффициенты которой в той или иной мере определяются временем запаздывания, что существенно увеличивает их диагностическую ценность.

В третьей главе решается задача определения условия устойчивости систем автоматического регулирования ПО и параметров ПИД-регулятора.

Для системного анализа диагностической информации определена соответствующая передаточная функция гидроагрегата.

Математическое описание динамики ПО с запаздыванием осуществляется дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом.

Динамика процесса управления гидроагрегата достаточно полно представлена в главе 2, а структурная схема регулирования скорости вращения турбины гидроагрегата с пропорциональным регулятором изображена на рис. 5.

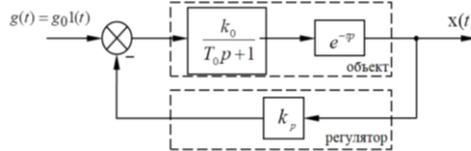


Рис. 5. Структурная схема САУ скорости вращения турбины гидроагрегата

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{T_0 p + 1 + k_0 k_p e^{-\tau p}}$$

Передаточной функции соответствует дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом

$$x'(t) + \frac{1}{T_0} x(t) + \frac{k_0 k_p}{T_0} x(t - \tau) = \frac{k_0 g_0}{T_0} (t - \tau), t \in [0, \infty), x(\xi) = 0.$$

На основании анализа данного уравнения получено условие устойчивости системы автоматического регулирования скорости вращения турбины гидроагрегата.

$$\frac{\tau}{T_0} \leq \frac{1}{k_0 k_p e}.$$

Полученное выражение определяет наличие в системе неустойчивых явлений, что в дальнейшем можно использовать как диагностический признак системы. Необходимо воспользоваться ограничением в 3 члена ряда Маклорена, как показано в главе 2, тогда передаточная функция будет иметь вид

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)},$$

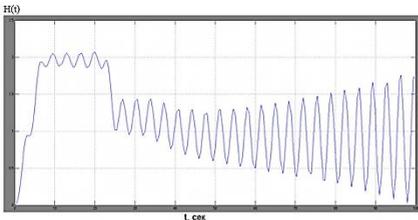


Рис. 6. Переходная характеристика при  $k_p = 15$

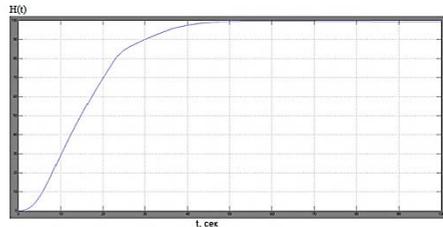


Рис. 7. Переходная характеристика при  $k_p = 0,15 * 10^{-2}$

где  $k$ – коэффициент передачи САР;  $T_1$  и  $T_2$ – постоянные времени, характеризующие суммарную инерционность гидрогенератора и сервомотора.

Значения коэффициентов  $k$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\xi$  можно определить на основании решения системы нелинейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{k_0}{1 + k_0 k_p}; T_1 + 2\xi T_2 = \frac{T + \tau}{1 + k_0 k_p}; \\ 2\xi T_1 T_2 + T_2^2 &= \frac{2\tau T + \tau^2}{2(1 + k_0 k_p)}; T_1 T_2^2 = \frac{T\tau^2}{2(1 + k_0 k_p)}. \end{aligned} \right\}$$

1. При  $k_p=15$  (условие устойчивости не выполняется) график переходного процесса представлен на рис. 6, при управляющем воздействии на рис. 2.

2. При  $k_p=0.15 \cdot 10^{-2}$  (условие устойчивости выполняется) график переходного процесса представлен на рис. 7.

Реальная САР скорости вращения турбины гидроагрегата состоит из последовательно соединенных турбины, маятника, сервомотора и золотника (см. рис. 8,а).

Так как инерционности и запаздывания гидроагрегата и турбины соизмеримы, а маятника, сервомотора и золотника существенно меньше, то в данной схеме следует учесть лишь их коэффициенты передачи. Тогда эквивалентная схема САР примет вид (см. рис. 8,б).

Соответственно передаточная функция замкнутой системы

$$W_{з.с.}(p) = \frac{k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1) + k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}},$$

где  $k_0 = k_1$ – коэффициент передачи гидроагрегата;  $k_p = k_2 k_3 k_4$ – коэффициент передачи регулятора.

Для объектов с одним входом и одним выходом предлагается модальный способ определения параметров ПИД-регулятора на основе принципа динамической компенсации: по экспериментальным характеристикам свободного движения объекта определяются параметры ПИД-регулятора таким образом, чтобы характеристики замкнутой системы соответствовали желаемым

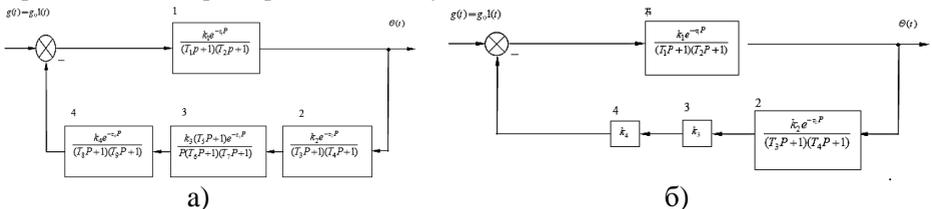


Рис. 8. Структурная (а) и расчетная (б) схемы реальной САР скорости вращения гидроагрегата:  $g(t)$  – входной сигнал (напряжение); 1,2,3,4 – соответственно передаточные функции турбины, маятника, сервомотора и золотника;  $k_1 - k_4, T_1 - T_4, \tau_1 - \tau_4$  – соответственно их коэффициенты передачи, постоянные времени и время запаздывания;  $\Theta(t)$  – выходной сигнал (скорость вращения турбины).

свойствам апериодического звена с минимальным временем регулирования. Следовательно, необходимо осуществить поиск параметров ПИД-регуляторов, самонастраивающихся по режимам работы динамического объекта.

Значение коэффициентов ПИД-регулятора для систем первого порядка можно определить по формулам

$$T_I = K_P / K_I = T / T = 1, T_D = K_D / K_P = T / T = 1,$$

где  $K_P$  – коэффициент пропорционального усиления,  $K_I$  – коэффициент интегрирующего звена,  $K_D$  – коэффициент дифференциальной составляющей,  $T_I$  – постоянная времени интегральной составляющей,  $T_D$  – постоянная времени дифференциальной составляющей.

Дифференциальные и интегральные составляющие взаимозависимы через поправочные коэффициенты  $\alpha = [0.1, 3]$  и  $\varepsilon = [0.1, 2]$  соответственно, как показано в табл.1,  $N$  – поправочный коэффициент фильтра низких частот.

Параметры ПИД-регулятора для звена первого порядка Таблица 1

Коэффициент регулирования	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$T_D$	$T_I$	$N$
Формулы	$T$	$\alpha T$	$\varepsilon T$	1	1	$2 \dots 20$
Пределы ограничений	$T$	$\alpha T$ $\alpha = 0.1 \dots 3$	$\varepsilon T$ $\varepsilon = 0.1 \dots 2$	$\varepsilon$ $\varepsilon = 0.1 \dots 2$	$1/\alpha$ $\alpha = 0.1 \dots 3$	

Значения коэффициентов ПИД регулятора вычисленные по формулам, предложенным выше, составили: 1)  $T=40.9$  с.,  $K_P=40.9$ ,  $K_I=4.09$ ,  $K_D=36.81$ ; 2)  $T=40.9$  с.,  $K_P=40.9$ ,  $K_I=20.45$ ,  $K_D=30.7$ .

Графики переходных процессов реакции систем с предложенными коэффициентами представлены на рис. 9.

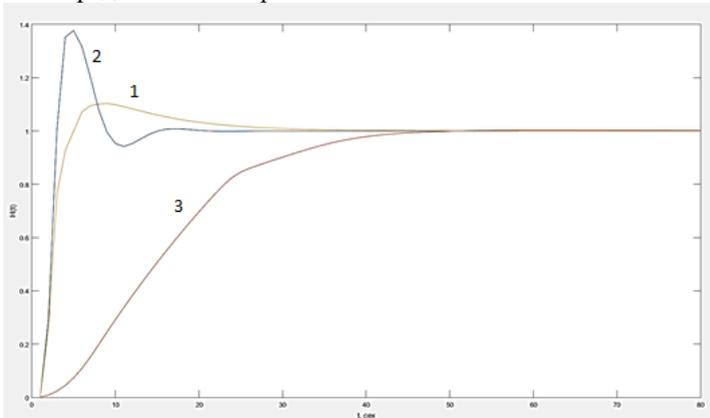


Рис 9. Графики реакции систем с различными параметрами ПИД-регулятора (1 – первая комбинация коэффициентов, 2 – вторая комбинация коэффициентов, 3 – экспериментальная кривая)

В обоих случаях присутствует момент перерегулирования, в первом – в пределах 10%, во втором –38%.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Получен диагностический признак устойчивости. Проведены экспериментальные исследования и вычислительные эксперименты для САР скорости вращения турбины.

2. Коэффициенты  $k$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  являются диагностическими параметрами, определяющими состояние системы автоматического регулирования в динамическом режиме ее функционирования. Эти коэффициенты могут быть определены на основании решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

3. При колебательном характере переходного процесса появляется возможность использовать резонансный метод диагностирования.

4. Принцип динамической компенсации, реализованный при определении параметров ПИД-регуляторов, позволяет существенно уменьшить время регулирования и полностью устранить перерегулирование, а в случае подходящего выбора постоянной времени высокочастотного фильтра – скомпенсировать внешние возмущения. Как следствие, при этом повышается запас устойчивости САР.

5. Принцип динамической компенсации позволяет формировать активные методы диагностирования ПО.

**В четвертой главе** рассматривается метод резонансного диагностирования колебательных промышленных объектов, метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

Резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов, если он допустим по техническим условиям, позволяет существенно сократить время выявления постепенных отказов и увеличить точность диагноза технического состояния ПО.

Рассмотрим сущность предлагаемого метода. В качестве примера рассмотрим простой RLC-контур, который можно аппроксимировать передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где  $T_2^2 = LC$ ,  $T_1 = RC$ , при условии  $T_1 < 2T_2$ ;

и амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)

$$W(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}}.$$

Резонансная частота определяется по формуле

$$W(\omega)/d\omega = 0$$

Алгоритм диагностирования будет выглядеть следующим образом:

1. Определить резонансную частоту контура  $f$ ;

2. Определить постоянную времени  $T_2$  по формуле  $T_2 = 1/(2\pi f)$  ;при условии  $T_2 \gg T_1$ ;
3. Определить постоянную времени  $T_1$  по формуле  $T_1 = 1/(2\pi f W(f))$  ;
4. Подключить конденсатор с известной ёмкостью  $C_0$  параллельно конденсатору  $C$ ;
5. Определить резонансную частоту контура  $f_0$ ;
6. Определить постоянную времени  $T_{20}$  по формуле  $T_{20} = 1/(2\pi f_0)$  ;
7. Определить значения структурных параметров  $R$ ,  $LiC$  по формулам  

$$R = T_1/C, L = (T_{20}^2 - T_2^2)/C_0, C = T_2^2/(T_{20}^2 - T_2^2) C_0.$$

Диагноз (прогноз) формируется на основании анализа значений структурных параметров RLC-контура.

В работе представлены примеры резонансного диагностирования системы зажигания, передней подвески автомобиля и САР скорости двигателя постоянного тока.

Передаточная функция контактной системы зажигания может быть представлена в виде

$$W(p) = \frac{b_5 p + k_1}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0},$$

где  $k_1, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  – постоянные коэффициенты передаточной функции.

Данная колебательная система имеет резонансы в низкочастотной и высокочастотных областях. На рис. 10 изображена АЧХ контактной системы зажигания.

Резонансные частоты низкочастотной  $\omega_1$  и высокочастотной  $\omega_2$  составляющих выходного сигнала системы зажигания можно определить по формулам

$$\omega_1 = \sqrt{1/(L_1 C_1 + L_2 C_2)}, \quad \omega_2 = \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2)/(L_1 C_1 L_2 C_2 (1 - k_M^2))},$$

где  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки катушки зажигания,  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки катушки зажигания,  $C_1$  – ёмкость

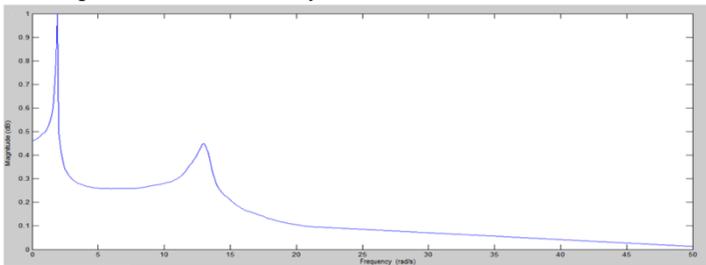


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика контактной системы зажигания автомобиля

конденсатора  $C_2$  – ёмкость, учитывающая распределённую ёмкость высоковольтной цепи,  $k_M$  – коэффициент взаимоиндуктивности.

С учетом пробных подключений конденсатора с известной емкостью  $C_{10}$  параллельно конденсатору  $C_1$  и конденсатора с известной емкостью  $C_{20}$  параллельно выходу высоковольтной цепи, а также измеренных значениях резонансных частот  $\omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$  составлена система нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{1/(L_1(C_1 + C_{10}) + L_2 C_2)} &= \omega_3; \\ \sqrt{1/(L_1 C_1 + L_2(C_2 + C_{20}))} &= \omega_4; \\ \sqrt{(L_1(C_1 + C_{10}) + L_2 C_2)/(L_1(C_1 + C_{10})L_2 C_2(1 - k_M^2))} &= \omega_5; \\ \sqrt{(L_1 C_1 + L_2(C_2 + C_{20}))/(L_1 C_1 L_2(C_2 + C_{20})(1 - k_M^2))} &= \omega_6. \end{aligned} \right\}$$

Результаты решения данной системы, полученные с использованием символьных вычислений, приведены в табл.2.

Результаты решения системы уравнений. Таблица 2

№	$L_1, \text{Гн}$	$L_2, \text{Гн}$	$C_1, \text{Ф}$	$C_2, \text{Ф}$
1	6.299e-3	19.098	2.700e-7	6.101e-11
2	-4.315e-3	-27.884	-5.401e-7	-1.22e-10
3	-1.985e-3	-17.572	-5.571e-7	-1.937e-10
4	3.97e-3	8.785	5.897e-7	1.326e-10

Символьное решение подразумевает возможность проводить вычисления и преобразования выражений с буквенными неизвестными, не подставляя при этом их значения. Результат решения данных выражений будет представлен в виде аналитической зависимости от этих параметров.

Такая постановка задачи по формированию алгоритма диагностирования системы зажигания является некорректной, так как получены четыре решения вместо одного. Однако второе и третье решения не имеют физического смысла, а решение 4 соответствует внезапному отказу системы зажигания, когда значения структурных параметров изменились практически вдвое относительно их номинальных значений, что не соответствует действительности.

Значение резонансных частот можно определить непосредственно по рабочим переходным процессам системы зажигания. Например, напряжение  $U$  на конденсаторе контактной системы зажигания имеет вид представленный на рис. 11.

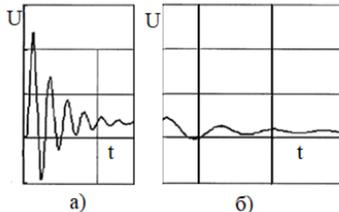


Рис. 11. Кривая изменения напряжения на контактах прерывателя:

а) процесс искрообразования, б) свободные колебания

Частота свободных колебаний напряжения в процессе искрообразования определяется по формуле  $\omega_7 = \sqrt{1/L_1 C_1}$ . При пробном подключении конденсатора с известной емкостью  $C_{10}$  эта частота изменится и будет определяться  $\omega_{70} = \sqrt{1/(L_1(C_1 + C_{10}))}$ .

Эти две формулы образуют систему двух нелинейных алгебраических уравнений, решая которую при измеренных значениях  $\omega_1$  и  $\omega_{10}$ , находим значения  $L_1, C_1$ .

Частота свободных колебаний контура  $L_1, C_1, L_2, C_2$  определяется по формуле  $\omega_8 = \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2)/(L_1 C_1 L_2 C_2 (1 - k_M^2))}$ . При пробном подключении конденсатора с известной емкостью  $C_{20}$  эта частота изменится  $\omega_{80} = \sqrt{(L_1 C_1 + L_2(C_2 + C_{20}))/(L_1 C_1 L_2(C_2 + C_{20})(1 - k_M^2))}$ .

Получаем еще одну систему двух нелинейных алгебраических уравнений, решая которую при найденных значениях  $L_1$  и  $C_1$ , измеренных значениях  $\omega_2$  и  $\omega_{20}$ , находим значения  $L_2, C_2$ .

На основании анализа полученных решений можно сделать вывод, что реальным значениям структурных параметров системы зажигания соответствуют значения постепенных отказов системы зажигания.

В диссертации также представлены примеры диагностирования подвески автомобиля и линейной стационарной системы автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока.

На основании проведенных теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований, представленных в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Для проведения диагностирования колебательных систем достаточно экспериментально определить величины резонансных частот.
2. Диагностирование на основании резонансных методов позволяет существенно уменьшить время формирования диагноза состояния колебательных систем.
3. Диагностирование резонансными методами колебательных систем позволяет получить более точную и полную информацию о постепенных отказах, которую можно использовать для прогнозирования внезапных отказов объектов диагностики.
4. Резонансные методы диагностирования, в случае их допустимости, позволяют оптимизировать стратегию поиска неисправностей.

**В пятой главе** разработана автоматическая система диагностирования мониторинга колебательных промышленных объектов с запаздыванием. Обобщенная функциональная модель системы представлена на рис. 12.

Автоматическая система диагностирования и мониторинга реализована как программа «Диагностика промышленных объектов». Программа написана на языке VisualBasic из пакета VisualStudio 2013 с использованием NET.Framework 3.5 в качестве основы визуализации и определения набора

базовых библиотек инструментов и пакета Matlab для расчётов. Общая структура программы представлена на рис. 13.

Входными данными являются: номинальные параметры системы зажигания (индуктивности первичной и вторичной обмоток катушки зажигания, емкость конденсаторов, емкость, учитывающая распределённую емкость высоковольтной цепи, коэффициент взаимоиндуктивности), амплитудно-частотная характеристика системы до и после пробных подключений.

Пример формы выполнения программы представлен на рис 14.



Рис. 12. Обобщенная функциональная модель.



Рис. 13. Структура программы

Диагностика системы зажигания

$W = \frac{p^4 + p^3 + p^2 + p}{p^4 + p^3 + p^2 + p}$

Индуктивность первичной обмотки

Индуктивность вторичной обмотки

Емкость конденсатора

Емкость высоковольтной цепи

Коэффициент взаимоиндуктивности

Частота 1

Резонансные частоты

Найденные параметры

Частота 2

Ввести резонансные частоты

Получить результаты

Ввести данные

Zажигание

Записать данные

Рис. 14. Пример форм «Диагностика системы зажигания»

При выходе значений параметров за допустимые пределы срабатывает сигнализация в виде сообщения. Также на графике могут быть отображены линии допуска, позволяющие оператору прогнозировать возможные неисправности или определять время обслуживания оборудования.

В данной главе описан алгоритм, включающий разработанные в ходе диссертационного исследования методы вторичной идентификации, резонансного диагностирования и пробного подключения для определения структурных параметров и принцип работы автоматической системы

диагностирования колебательных промышленных объектов с запаздыванием на всех технологических этапах диагностирования, необходимых для формирования достоверного диагноза технического состояния объекта, а именно: измерение, идентификация, диагностика, мониторинг и формирование решения. Представлена реализация системы на примере двух ПО: подвески автомобиля и системы зажигания. Показаны результаты работы автоматической системы диагностирования. Акты внедрения представлены в приложениях диссертации.

### **Основные результаты диссертации**

При проведении диссертационного исследования были получены данные, позволяющие повысить точность диагностической информации за счёт снижения погрешности структурной и параметрической идентификаций и применения новых методов диагностирования ПО, а также была разработана автоматическая система диагностирования. При этом получены следующие результаты:

1. Разработан метод вторичной идентификации, позволяющий в значительной мере уменьшить интегральную ошибку идентификации динамики ПО по сравнению с существующими методами (метод Эйлера, интерполяционный, интегральных площадей, последовательный метод наименьших квадратов). Данный метод позволяет учитывать составную запаздывания  $\tau$  и повторное уточнение значений структурных параметров исследуемого ПО.

2. Предложенный модальный способ может применяться для реализации редуцированных моделей управления объектами первого порядка с транспортным запаздыванием, объектами третьего, четвертого и более высоких порядков, а также при исследовании многомерных и многосвязных систем управления.

3. Разработан и апробирован резонансный метод диагностирования колебательных процессов в ПО, позволяющий получить более точную и полную информацию, которую можно использовать для прогнозирования постепенных отказов ОД, в отличие от существующих на данный момент методов практической диагностики.

4. В процессе идентификации по разработанному автором методу вторичной идентификации могут быть получены передаточные функции, коэффициенты которых в той или иной мере определяются временем запаздывания, что существенно увеличивает их диагностическую ценность.

5. Разработанная система может быть применена и для других (электротепловых, электромеханических и гидромеханических) объектов, которые допускают данный метод диагностики. Предложенная система диагностирования колебательных промышленных объектов имеет большие возможности модернизации в области получения данных, расширения функций мониторинга и прогнозирования, объединения с другими программами.

Разработанные методы вторичной идентификации и резонансного

диагностирования промышленных колебательных объектов успешно реализованы в автоматической системе диагностирования колебательных промышленных объектов с запаздыванием (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667480). Система успешно внедрена и показывает свою эффективность на предприятиях автодиагностирования ООО АВТОРАЙ. При незначительной модернизации предложенная автоматическая система может быть использована и на других промышленных объектах, допускающих использование разработанного метода резонансного диагностирования колебательных промышленных объектов. Результаты диссертационного исследования, в том числе метод вторичной идентификации, резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов и автоматическая система, успешно внедрены в учебный процесс по направлению подготовки «Управление и информатика в технических системах» в рамках дисциплины «Идентификация и диагностика технических систем».

## **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ Монографии**

1. **Ульянов А.Д.**, Лузгин В.В. Методы идентификации и диагностики промышленных объектов : монография. - Братск : Изд-во БрГУ, 2017. - 146 с.

### **Публикации в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК**

2. **Ульянов А. Д.** Методология формирования алгоритмов идентификации и диагностирования аналоговых промышленных объектов./ Лузгин В.В. Ульянов А.Д. / Системы. Методы. Технологии.- 2013. - №3(19).– С. 96-100.

3. **Ульянов А.Д.** Резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов./ Ульянов А.Д, Лузгин В.В./Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).- 2015. № 1 (40).– С. 42-45.

4. **Ульянов А.Д.** Структурная и параметрическая идентификация процесса разгона гидрогенератора со сложным управляющим воздействием./ Ульянов А.Д./ Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. №2 (46).– С. 105-109.

5. **Ульянов А.Д.** Прикладной метод исследования промышленного объекта с запаздыванием как объекта диагностики на примере САР гидроагрегата Братской ГЭС/ Ульянов А.Д./ Системы. Методы. Технологии.- 2016. - №1(29).– С. 70-75.

6. **Ульянов А.Д.** Автоматизированная система диагностики и мониторинга колебательных объектов/ Колтыгин Д.С., Седелников И.А., Ульянов А.Д./Автоматизация в промышленности. 2020. № 4. С. 12-18.

### **Доклады в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus**

7. **Ulyanov A.D.** Applied method for identification and diagnosis of automatic dc-motor speed control systems. В сборнике: 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019 2019. С. 8743003.

### Публикации в других изданиях

8. **Ульянов А.Д.** Электромеханическая модель гидрогенератора./Ульянов А.Д./ Молодая мысль – развитию энергетики: материалы IV Межвузовской (XI) научно-технической конференции студентов и магистров – Братск: изд-во БрГУ, 2011.– С. 177-181.
9. **Ульянов А.Д.** Автоматизированная система группового регулирования режимов работы Иркутской ГЭС/Ульянов А.Д./ Молодая мысль – развитию энергетики: материалы V Межвузовской (XII) научно-технической конференции студентов и магистров – Братск: изд-во БрГУ, 2012. – С.210-213.
10. **Ульянов А.Д.** Перспективные методы и алгоритмы диагностирования аналоговых промышленных объектов./Ульянов А.Д. Лузгин В.В./ Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013.– С.225-231.
11. **Ульянов А.Д.** Идентификация процесса разгона гидрогенератора Братской ГЭС. /Ульянов А.Д./ Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. – Т.1. – 2015. – С. 81-84
12. **Ульянов А.Д.** Структурная и параметрическая идентификация процесса разгона гидрогенератора. /Ульянов А.Д./ В сборнике: Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.З. Зверовщикова, И.И. Воячека, Д.В. Кочеткова. 2014. – С.92-98.
13. **Ульянов А.Д.** Параметрическая идентификация динамики разгона гидрогенератора Братской ГЭС. /Ульянов А.Д./ В сборнике: Новые технологии и проблемы технических наук. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки.г. Красноярск, 2014. – С. 19-21.
14. **Ульянов А.Д.** Модальный способ определения параметров ПИД-регуляторов для системы автоматического управления гидроагрегатом. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. – №.2. – 2015. – С.48-52.
15. **Ульянов А.Д.,** Лузгин В.В., Горобцов Д.С. Исследования промышленного объекта с запаздыванием как объекта диагностики на примере САР гидроагрегата Братской ГЭС. Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. - № 1. - 2016.– С.88-92.
16. **Ульянов А.Д.** Прикладной метод диагностирования линейной стационарной САР скорости двигателя постоянного тока. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. – Т.2. – Братск : Изд-во БрГУ, 2017. – С.51-54
17. **Ульянов А.Д.,** Лузгин В.В., Колтыгин Д.С. Экспериментальное исследование тепловых объектов методом частотных характеристик. Труды

Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. – Т.2. – Братск : Изд-во БрГУ, 2017. – С. 54-63.

18. **Ульянов А.Д.** Идентификация динамики линейной стационарной САР скорости двигателя постоянного тока. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т.. – Т.1. – Братск : Изд-во БрГУ, 2018. – С. 43-46.

19. **Ульянов А.Д.** Общая постановка задачи идентификации и диагностирования промышленных объектов. Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 43-45.

#### **Свидетельства о регистрации**

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667480. Диагностика промышленных объектов / А.Д. Ульянов, Д.С. Колтыгин, И.А. Седельников. – Заявка №2019663790. Дата поступления 21 октября 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24 декабря 2019 г.