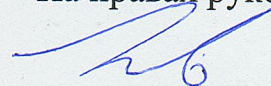


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение высшего образования  
«Братский государственный университет»

На правах рукописи



Ульянов Александр Дмитриевич

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

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Лузгин Владимир Васильевич



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ методов идентификации и диагностирования промышленных объектов.....	12
1.1. Общая постановка задачи идентификации и диагностирования промышленных объектов .....	12
1.2. Анализ методов идентификации промышленных объектов .....	16
1.3. Анализ моделей объектов диагностирования .....	19
1.4. Анализ методов диагностирования промышленных объектов .....	24
Выводы .....	31
Глава 2. Идентификация промышленных объектов с запаздыванием .....	33
2.1. Анализ методов идентификации промышленных объектов по результатам анализа коэффициентов дифференциальных уравнений.....	34
2.2. Влияние запаздывания на результат идентификации промышленных объектов.....	37
2.3. Метод вторичной идентификации.....	42
2.4. Идентификация динамики разгона гидрогенератора .....	46
2.5. Идентификация динамики линейной стационарной САР скорости двигателя постоянного тока .....	53
Выводы .....	57
Глава 3. Анализ устойчивости систем автоматического регулирования с запаздыванием.....	59
3.1. Определение критерия устойчивости систем автоматического регулирования с запаздыванием.....	60
3.2. Модальный способ нахождения настроек ПИД-регулятора для промышленных объектов с запаздыванием .....	67
3.2.1. Алгоритм ПИД-регулирования.....	68
3.2.2. Реакция системы на ввод ПИД-регулятора.....	70
3.2.3. Определение параметров ПИД-регулятора для промышленных объектов первого порядка с запаздыванием .....	74

Выводы .....	80
Глава 4. Диагностирование промышленных объектов с запаздыванием.....	81
4.1. Резонансный метод диагностирования .....	81
4.2. Диагностирование подвески автомобиля.....	87
4.3. Диагностирования линейной стационарной системы автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока .....	89
Выводы .....	94
Глава 5. Автоматическая система диагностирования .....	95
5.1. Структура автоматической системы диагностирования.....	95
5.2. Описание автоматической системы диагностирования.....	102
Выводы .....	109
Заключение и выводы .....	110
Список литературы .....	112
Приложения .....	128
Приложение 1. ....	129
Приложение 2. ....	130
Приложение 3. ....	131

## Введение

**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. Бесекер-

ского, 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. Мозгалеvский, П.П. Пархоменко, И.М. Синдеев, Е.С. Согомонян и других.

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 апробирован на реальных механических, электрических и электромеханических ПО.

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

**Предметом исследований** является техническое состояние механических, электрических и тепловых 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:

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

2. Разработать инженерный метод расчета погрешностей в определении структурных параметров промышленных объектов с учетом транспортного запаздывания.

3. Разработать прикладные резонансные методы диагностирования электрических и механических колебательных промышленных объектов.

4. Разработать автоматизированную 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 автоматизированной 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 позволяет 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. Особенность данного алгоритма заключается в том, что допускается использование любого управляющего воздействия, для проведения идентификации объекта исследований.

Результаты исследований позволяют 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: Microsoft Excel, MatLab 2015, Time-DelayId v. 1.00, VtorId v. 1.00.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методы и алгоритмы вторичной идентификации, позволяющие повысить точность идентификации динамики ПО и достоверность диагноза состояния ПО.

2. Метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, а также метод пробных подключений, позволяющие оперативно определять величины тех структурных параметров ПО, которые имеют определённую диагностическую ценность.

3. Резонансные методы диагностирования, их практическое применение для электрических, механических и электромеханических ПО.

4. Автоматизированная 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 позволяют определять такие параметры ПО, которые не могут быть измерены непосредственно или для определения которых требуется проводить дорогостоящие и трудоёмкие эксперименты. Результаты диссертационных исследований позволяют определять не только диагностическую ценность



исходных математических моделей объектов диагностики, но и алгоритмов их диагностирования, а также существенно увеличить глубину и достоверность формируемого диагноза. Основные результаты работы в виде методов, алгоритмов и программ использовались для разработки системы автоматического диагностирования систем зажигания, подвесок автомобилей и двигателей постоянного тока, подтвержденные 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 22 научных работах, из них 4 в реферируемых журналах из перечня ВАК РФ, статья в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus была издана монография и было 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 используемой литературы, включающего 132 наименования, 3 приложений. Общий объем основной части составляет 131 страница машинописного текста и включает 41 рисунок и 7 таблиц.

**В главе 1** дан обзор методов идентификации и диагностирования, сформулированы общие задачи идентификации и диагностирования ПО, представлены классификации методов идентификации ПО и моделей и методов диагностирования ПО. На основании проведенного обзора отмечается, что проблемы повышения качества прогнозирования состояния объекта, является актуальной и требующей пристального внимания.

**В главе 2** рассматривается влияние запаздывания на результат идентификации ПО, представлен и обоснован метод вторичной идентификации, проведена идентификация различных ПО: процесса разгона гидрогенератора Братской ГЭС со сложным управляющим воздействием, динамики линейной стационарной системы автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока.

**В главе 3** ставятся задачи определения критериев устойчивости систем автоматического регулирования ПО и определения параметров ПИД-регулятора системы модальным методом.

**В главе 4** рассматривается метод резонансного диагностирования колебательных промышленных объектов и метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

**В главе 5** рассматривается автоматизированная система диагностирования и мониторинга колебательных промышленных объектов с запаздыванием. Её алгоритм и пути реализации, а также области возможного применения.

Приложение 1. Представлено свидетельство о регистрации программы ЭВМ.

Приложение 2. Представлен акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «БрГУ».

Приложение 3. Представлен акт внедрения результатов диссертационного исследования в производственный процесс .

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Создание и длительная эксплуатация промышленных объектов (ПО) в настоящее время неразрывно связаны с системами автоматического управления. Одной из важнейших задач систем автоматического управления является поддержание ПО в надлежащем техническом состоянии. Достижение этой цели невозможно без проведения своевременной идентификации и диагностики. Эти процессы неразрывны и неотделимы друг от друга, так как от качества и точности идентификации всецело зависит полнота диагноза технического состояния исследуемого объекта.

Для повышения глубины и точности полученной в процессе диагностирования информации о техническом состоянии объекта, требуется решить задачу по разработке соответствующих технологий системного анализа диагностической информации. Решение данной задачи должно не только повысить работоспособность исследуемого оборудования, но и сократить трудоемкость полученной информации. Что как следствие приведет к ситуации, когда внедрение систем автоматического диагностирования будет экономически выгодно и обоснованно. Тем более что, современный этап развития промышленности, переход от частичной к полной автоматизации, имеет все предпосылки для реализации этих решений.

### **1.1. Общая постановка задачи идентификации и диагностирования промышленных объектов**

На первом этапе исследования методов идентификации и диагностирования промышленных объектов необходимо ввести основные понятия и определения, а также определить условия корректности для процесса идентификации. Если же условия корректности выполняться не будут, необходимо установить способы перехода к приближенным значениям и итерационным методам решения.

Наиболее обобщающее определение *идентификации* было предложено в работе [1]: «Идентификация есть определение на основании анализа входа и выхода такой системы из заданного класса систем, которой эквивалентна исследуемая система».

Процесс идентификации ПО можно разделить на два этапа:

1. *структурная идентификация;*
2. *параметрическая идентификация.*

На первом этапе необходимо определить класс уравнений и структуру математической модели исследуемого объекта.

На втором этапе идентификации ПО нужно разработать алгоритмы определения структурных параметров.

***Структурные параметры*** — это физические величины (выраженные в миллиметрах, градусах и т.п.), определяющие связь и взаимодействие элементов ПО и его функционирование в целом. В процессе эксплуатации параметры технического состояния изменяются от номинального до предельного значения под влиянием различных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Предельные значения структурных параметров обусловлены вероятностью отказов и неисправностей ПО и являются в основном значениями технико-экономического характера.

Если идентификация ПО проводилась с целью получения адекватной, с физической точки зрения, математической модели и нахождения таких значений структурных параметров, которые полностью зависят от технического состояния объекта, то такой процесс можно назвать процессом *диагностирования* ПО.

Пусть математическая модель представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{\vec{x}}(t) &= f(t, \vec{x}, \vec{a}), \vec{x}(0) = \vec{x}_0; \\ \vec{y}(t) &= g(t, \vec{x}), \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где  $t$  – время,  $\vec{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$  – вектор, характеризующий внутреннее состояние ПО,  $\vec{a} = (a_1, \dots, a_n)^T$  – вектор структурных параметров ПО,  $\vec{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_m(t))^T$  – вектор выходных сигналов ПО,  $f, g$  – дополнительные функции,  $T$  – интервал времени экспериментальных наблюдений.

$$N = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i1} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix}_{m \times p},$$

где  $y_{ij} = y_i(t_j)$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{0, p}$ .

Таким образом, задача *параметрической идентификации* (1.1) по полученным данным  $N$  сводится к определению числовых значений вектора структурных параметров модели, при которых значения математической модели максимально соответствуют экспериментальным данным исследуемого ПО и его откликам [2,3]. Задача диагностирования ПО сводится к частному решению задачи параметрической идентификации, в том случае если полученные значения определяют техническое состояние ПО. Сформулированную ранее задачу параметрической идентификации (1.1) можно представить в операторной форме

$$y = Ma, \quad (1.2)$$



где оператор  $M$  является суперпозицией функций  $f, g$  и оператора интегрирования задачи Коши системы (1.1),  $a \in A \subseteq R^k, y \in Y \subseteq R^m$ .

На практике наиболее распространён случай, когда точное значение вектора откликов  $y(t)$  неизвестно, а известны лишь его некоторые приближенные значения, тогда задачу (1.2) необходимо изменить

$$y_\delta = Ma. \quad (1.3)$$

Можно утверждать, что задача (1.2) поставлена корректно, если будет выполняться условия, сформулированные Адамаром [4]:

- для любого  $y \in R(M) = Y$  существует решение  $a \in A$  (условие разрешимости), где  $R$  – область значений оператора  $M$ ;
- решение является единственным в  $A$  (условие однозначности);
- решение непрерывно зависит от  $y$  (условие устойчивости).

Нарушение хотя бы одного из вышеперечисленных условий позволяет сделать вывод о некорректности постановки задачи.

С другой стороны, задача, сформулированная в терминах приближенных значений вектора откликов (1.3), является в общем случае некорректной. Это может произойти вследствие следующих причин:

- нарушение условия разрешимости. Если приближенные значения вектора откликов не принадлежат множеству  $Ma$ ;
- устойчивость к ошибкам. Если существует множество решений (1.3) или обратный оператор не соответствует условию непрерывности.

Отсюда следует, что задача (1.3) не может дать корректного решения. В этом случае необходимо перейти к итерационным методам решения, позволяющим получить ответ в некотором приближении.

Необходимо сформулировать условие для получения приближенных значений

$$a_\delta = \arg(\inf_{a \in A} p_y(Ma, y_\delta)), \quad (1.4)$$

где  $p_y$  – метрика пространства сравнения  $Ma$  с  $y_\delta(t)$ ,  $\inf$  – точная нижняя граница,  $\arg$  – аргумент комплексного числа

После выполнения условия (1.4) нельзя утверждать, что задача (1.3) стала корректной. Однако, с другой стороны, математический аппарат решения таких задач находится на достаточно высоком уровне и может быть применён в нашем случае.

Анализ существующих методов идентификации и диагностирования, способных решать поставленную задачу, будет проведен в следующих разделах данной главы диссертационного исследования.

## 1.2. Анализ методов идентификации промышленных объектов

Из определения *диагностирования ПО* следует, что от точности и качества проведения процесса идентификации всецело зависит качество поставленного диагноза состояния диагностируемой системы.

В ходе проведения идентификации ПО, можно выделить две стратегии:

- определение модели ПО и его структурных параметров;
- определение структурных параметров ПО по заранее известной или принятой модели.

Основываясь на определении, приведенном в начале главы, для реализации процесса идентификации необходимо определить класс объектов  $\phi = \{S\}$ , класс выходных сигналов  $U$  и критерии эквивалентности. Если за критерий эк-

вивалентности принять функцию потерь, то процесс идентификации можно сформулировать, используя термины теории оптимизации.

Необходимо найти такую модель  $S \in \phi$ , которая минимизирует потери  $V$ , где  $V$  – функция потерь, являющаяся функционалом выхода ПО и его модели  $Y_m$ :

$$V = V(y, y_m).$$

Во время синтеза систем управления чаще всего прибегают к дифференциальному подходу: в процессе управления могут не учитываться результаты идентификации ПО. Однако следует понимать, что данный подход не способен привести к качественной реализации системы управления, т.к. ошибки, полученные в процессе идентификации, могут играть существенную роль при управлении ПО [5,6]. Поэтому более целесообразно использование подхода, при котором будут учтены результаты идентификации. Метод, предложенный А.А. Фельдбаумом [7], позволяет реализовать систему управления ПО, совмещающая результаты идентификации и управления.

ПО могут быть классифицированы по нескольким признакам, с точки зрения идентификации:

- по зависимости между входом и выходом сигналов (статические, динамические, одномерные, многомерные, линейные, нелинейные),
- по возмущениям (с дрейфом случайным и неслучайным, без дрейфа),
- по подверженным помехам входам (помехи только на входе, помехи на входе и выходе),
- по уровню помех (высокий уровень, низкий уровень),

- по способу проведения эксперимента (объекты, допускающие активный эксперимент; объекты, допускающие пассивный эксперимент).

Модели идентифицируемых ПО могут быть представлены несколькими способами:

- дифференциальными уравнениями (ДУ),
- переходными функциями,
- передаточными функциями.

Чаще всего предпочтение отдается переходным функциям. Классификация методов идентификации (рис 1.1) может быть осуществлена по разным признакам, в частности:

- по характеру исследуемого объекта,
- по виду входных и выходных сигналов,
- по способу получения информации,
- по алгоритмам вычислений и т.д.

Метод активного эксперимента в процессе идентификации подразумевает подачу на вход ПО известного и поддающегося генерации сигнала (импульс, ступенчатый сигнал, синусоида, белый или коррелированный шум и так далее).

Для большинства ПО, используемых на производстве, процесс идентификации может быть осуществлён только в процессе их нормального функционирования.

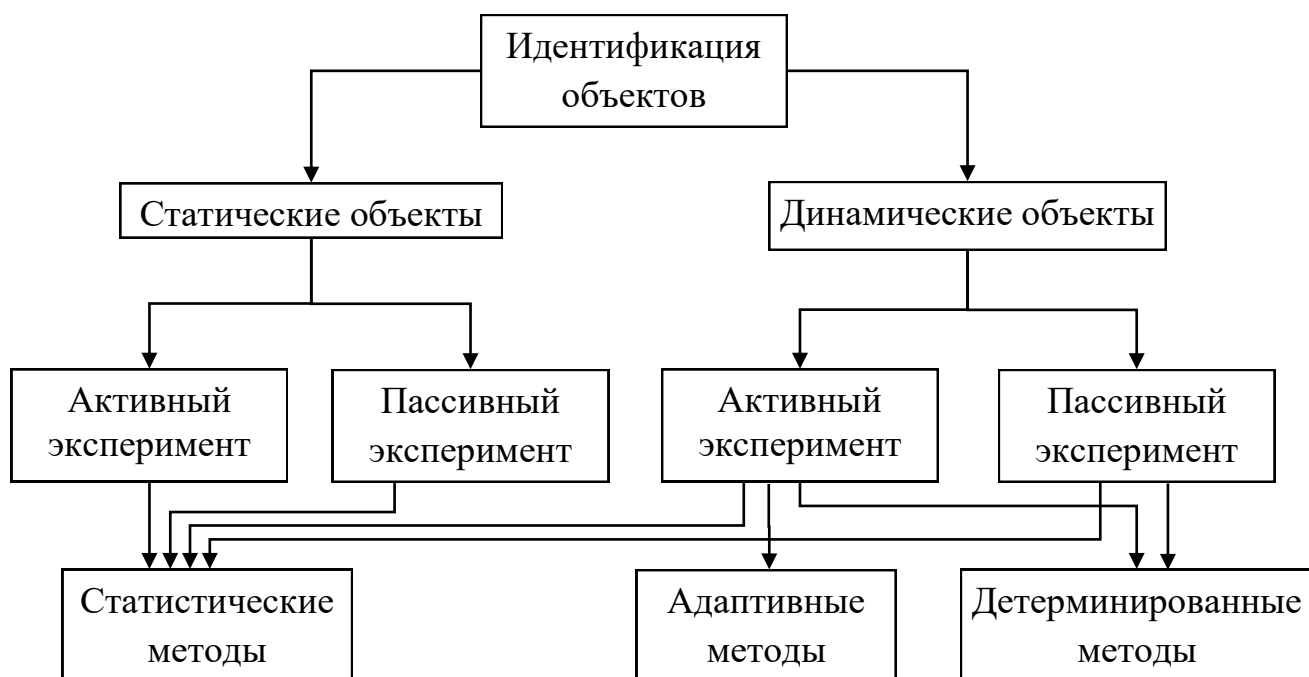


Рис. 1.1. Классификация методов идентификации

Если в процессе идентификации помехи отсутствовали, то можно применять детерминированные методы [8-14].

Для определения связи между входными и выходными процессами ПО при управляющих сигналах известной формы можно использовать интеграл Дюамеля, а в статистических методах – уравнение Винера-Хопфа [14-23].

В диссертации рассматривается идентификация динамических объектов, результат которой представлен в виде передаточной функции, как наиболее полно отвечающий требованиям дальнейшего анализа, с целью получения диагностической информации.

### 1.3. Анализ моделей объектов диагностирования

Диагностика ПО, как отдельная наука, сформировалась во второй половине прошлого века. Диагностика оперирует терминами теории надёжности, измерений и анализа информации. Значимый вклад в развитие современной ди-

агностики внесли информационные технологии и кибернетика. Современная диагностика уже неотделима от вычислительной техники и является частью автоматических систем управления и позволяет существенно продлить срок службы используемых ПО за счет своевременного ремонта и замены наиболее поврежденных компонентов.

Определение зависимостей формы и величины реакции исследуемого объекта от значений его структурных параметров невозможно без некоторого упрощения. Под упрощением будем понимать процесс, при котором выделяются некоторые существенные для диагностирования стороны реальных ПО и отбрасываются второстепенные.

Другими словами, подвергаться диагностированию будет уже не реальный объект, а его модель из-за сложности и многообразия связей и взаимозависимостей внутри объекта диагностирования (ОД). [24]

На рис. 1.2 представлена классификация моделей диагностирования ПО по виду зависимости структурных параметров от выходных процессов объекта. Все разнообразие ОД может быть описано моделями трех видов:

- физическими,
- интуитивными,
- символическими.

Функционирование физической модели ОД должно быть основано на тех же физических процессах, что и в реальном ОД.

Одним из преимуществ данной модели является использование её вместо реального ОД в процессе диагностирования либо параллельное подключение к реальному объекту.



При этом в некоторых случаях полученная модель может быть сложнее, чем реальный ПО, т.к. она должна быть подобна ему при всевозможных комбинациях его структурных параметров, что может потребовать введения элементов настройки структурных параметров.

Интуитивная модель основывается на опыте работы оператора с данным ПО. Зачастую опыт и квалификация обслуживающего персонала позволяют обнаружить и устранить неисправность ПО гораздо быстрее и точнее разработанного метода диагностирования.

Символические модели ОД могут быть представлены в виде записей:

- дифференциальных уравнений,
- функциональных зависимостей,
- таблицы неисправностей,
- графов и т.д.

В зависимости от типа реального ОД и степени его описания символические модели могут быть подразделены на:

- детерминированные,
- вероятностные,
- вероятностно-детерминированные.



Рис. 1.2. Классификация моделей диагностирования

Детерминированные модели могут быть представлены как функциональные, аналитические, экстремальные, адаптивные и конечные автоматы.

Экстремальные модели целесообразно использовать в тех случаях, когда состояние реального ОД зависит не от значений структурных параметров, а от параметров составных частей реального ПО в определенных режимах работы. [25-27]

Адаптивные модели получаются в процессе идентификации реального ПО и исходной модели, идентичной реальному ПО при номинальных значениях его структурных параметров.

Использование вероятностных моделей целесообразно в тех случаях, когда изучаемые процессы в исследуемых ПО могут быть записаны в аналитическом виде, но численные значения параметров математической модели меняются в реальных условиях. Также использование данных моделей позволяет произвести диагностирование ПО в случае невозможности установления детерминированных зависимостей, в случае большого количества помех или иных искажающих воздействий.

Вероятностные модели делятся на:

- информационные,
- распознаваемые образы,
- корреляционные.

В информационных моделях исследуемые ПО могут быть представлены совокупностью его выходных процессов, содержащих некоторое количество информации о его состоянии. Другими словами, косвенным образом отражающих численные значения структурных параметров, с учетом априорных знаний

о вероятности выхода структурных параметров за пределы нормальных значений в процессе нормальной эксплуатации.

Под вероятностной моделью в качестве распознаваемого образа понимают совокупность регистрируемых выходных процессов, принадлежащих одному классу значений структурных параметров.

Корреляционные модели позволяют определить степень зависимости выходных процессов от структурных параметров исследуемого ПО.

Решение задачи моделирования во многом определяет дальнейший метод диагностирования. При решении задачи моделирования следует стремиться к получению детерминированных моделей, т.к. они наиболее просто реализуемы и позволяют получить указания к выбору дальнейшего метода диагностирования и способ его реализации без сбора дополнительных статистических данных о его работе в режиме нормального функционирования.

#### **1.4. Анализ методов диагностирования промышленных объектов**

В настоящее время существует широкий спектр методов диагностирования ПО. Они характеризуются большим разнообразием технических средств измерений и анализа полученной информации, а также методами и правилами постановки задачи диагностирования.

Разработке и анализу методов диагностирования посвящено достаточно много работ [14, 16-19, 28-31]. Наиболее исследованными являются методы диагностирования ПО, функционирование которых может быть описано аппаратом математической логики. При этом разработка метода диагностирования ОД, а также его оптимизация может быть сведена к получению оптимальных

логических функций. Если ОД представлен в виде непрерывного аналогового объекта, то задача диагностирования может быть сведена к составлению его дифференциальной модели и алгебраических уравнений.

Классификация методов диагностирования может быть проведена по математическим моделям, которые применялись для создания модели ПО. Классификация методов диагностирования представлена на рис. 1.3 [32-38].

Методы диагностирования делятся на:

- индикационные,
- поисковые,
- интуитивные.

Индикационные методы характеризуются наличием большого количества датчиков, особенно в многоэлементных объектах. Информация с датчиков может сниматься как в ручном режиме, так и в автоматическом. Недостатки данного метода очевидны – сложность эксплуатации системы диагностирования, большой объем получаемой информации, невозможность использования данного метода для ПО с большим количеством важных элементов.

В поисковых методах диагностирования обнаружение структурных параметров, вышедших за пределы нормальных величин, осуществляется при помощи поиска. При этом можно выделить два вида поиска: комбинационный и последовательный. Комбинационный вид поиска определяет структурные параметры, вышедшие за пределы допусков, путем выполнения заданного числа проверок, которые могут выполняться в любом порядке. При последовательном виде поиска проверки величин всех структурных параметров производятся в заданном порядке. Результат каждой проверки необходимо проанализировать, и если



Рис. 1.3. Классификация методов диагностирования



не удаётся обнаружить структурные параметры, вышедшие за пределы допуска, то можно приступить к следующей проверке.

Комбинационный и последовательный поиска могут быть подразделены на активный и пассивный вид поиска.

В процессе активного поиска определяются величины таких структурных параметров, которые имеют возможность настройки и способны оптимизировать процесс поиска при неизменных величинах остальных структурных параметров. В процессе пассивного поиска определяются значения таких структурных параметров, значения которых не могут быть изменены в процессе нормального функционирования ОД. [39]

Примером активного вида поиска может являться экстремальный поиск [40], в результате которого будут сформированы такие зависимости обобщенного параметра объекта от обобщенных параметров составляющих его устройств, при реализации которых искомый параметр будет иметь оптимальную величину.

При диагностировании объекта исследований методом идентификационного поиска необходимо установить соответствие между структурными параметрами объекта и диагностируемой модели. Данный подход является пассивным, т.к. результат диагностирования может быть получен в ходе параметрической идентификации ПО. В данном методе под исследуемой моделью подразумевается модель полученная в ходе структурной идентификации при номинальных величинах диагностируемых структурных параметров.

Поисковый метод диагностирования может быть сформулирован в терминах задачи распознавания образов: после проведения некоторого конечного числа измерений и анализа полученных значений структурных параметров ис-

следуемого объекта необходимо выбрать оптимальное решение о его состоянии, входящее в некоторую совокупность состояний данного объекта.

Интуитивный метод диагностирования во многом перекликается с рассмотренной ранее интуитивной моделью диагностирования. Главным отличием интуитивного метода диагностирования заключается в следующем: данный метод основан на ассоциативной обработке информации и опыте персонала, в отличие от поисковых методов, которые основаны на формально-логической обработке полученных данных. Часто возникает такая ситуация, когда опытный оператор, не располагающий достаточно совершенными приборами диагностирования, делает выводы о состоянии диагностируемого объекта с приемлемой точностью и за довольно короткое время, нежели диагностические стенды и приборы. В большинстве случаев это происходит потому, что обслуживающий персонал начинает диагностику с тех устройств или элементов, которые имеют самую низкую надежность или их проверка занимает меньше времени и затрат.

В тех случаях, когда таких элементов несколько, целесообразно начинать диагностику с тех элементов, после проверки которых будет получена максимальная диагностическая информация с наименьшей стоимостью её получения. Если после проведения всех тестов, оператор не обладает достаточной информацией для однозначного диагноза ОД, то перед ним встает задача о принятии байесовского решения, т.е. необходимо выбрать тот элемент который с большей вероятностью способен привести к неисправности всего ОД.

Большой класс реальных ПО в той или иной форме обладают инерционностью. Процессы, протекающие в них, могут быть описаны самыми разными способами. Это обуславливает большое разнообразие разработанных и находящихся в разработке методов их диагностирования [41-46]. Если этап разра-

ботки данных методов позволяет приступить к их реализации, то чаще всего задача диагностирования сводится к проблеме выбора оптимального метода диагностики с точки зрения уменьшения затрат на постановку диагноза.

В большинстве случаев предпочтение необходимо отдавать детерминированным методам поиска, т.к. они являются наиболее простыми и универсальными. Тогда как в вероятностно-детерминированных и вероятностных методах необходимо иметь достаточно большую базу статистической информации об эксплуатации и испытаниях объекта исследований. При этом диагноз, полученный при применении данных методов, будет носить вероятностный характер. Основным недостатком детерминированных методов является, то что после изменения структуры, необходимо производить повторное накопление статистических данных для получения диагноза.

Достоинства детерминированных методов диагностики становятся заметны в тех случаях, когда ценность полученного диагноза определяется конкретными значениями структурных параметров. Ценность данного диагноза становится очевидна при диагностировании постепенных отказов.

Решение о возможности использования детерминированных методов диагностирования необходимо принимать, опираясь на следующие условия:

- информационная плотность исследуемого объекта диагностики соответствует заданной глубине диагноза,
- между структурными параметрами и выходными процессами ОД можно установить математическую зависимость,
- существует возможность реализовать алгоритм диагностирования для требуемой глубины диагноза.

Выходные процессы в общем случае определяются структурной схемой ПО, значениями его структурных параметров, величиной возмущения, а также режимом его функционирования. Для получения наиболее достоверного диагноза о состоянии ПО необходимо, чтобы диагностическая информация была получена при динамическом режиме работы во время нормального функционирования объекта.

Для описания динамического режима работы ПО наиболее целесообразно использовать ДУ, т.к. они позволяют учесть связь между выходными процессами, возмущениями, структурными схемами и структурными параметрами объекта.

Данные уравнения могут быть представлены в виде линейных ДУ, или же в виде дифференциальных уравнений с частотными производными. Для постановки диагноза с достаточной глубиной и достоверностью результата может быть использована модель, описанная при помощи линейных ДУ.

Для достижения указанных требований достаточным является получение модели ПО в ходе идентификации выходных процессов (временных характеристик объекта) и получение значений коэффициентов ДУ.

Формулировка задачи поиска значений структурных параметров ПО в результате идентификации выходных процессов, при условии незначительных возмущений, может быть записана следующем виде. Если априори известна структурная схема ПО, входные воздействия и выходные процессы, то при наличии постепенных (прогнозируемых) отказов необходимо найти значения структурных параметров ОД. Следует заметить, что внезапные отказы – внезапное изменение структурных параметров на значительную величину, способное привести к изменению структурной схемы, в предложенной формулировке

задачи не учитывают. В данной формулировке можно заметить, что задача поиска значений структурных параметров схожа с задачей синтеза.

Если в ходе проведения диагностирования ПО предложенным методом, установлено, что некоторые структурные параметры не меняют своего значения в процессе всего срока эксплуатации, то их значения можно принять за константы и приравнять их к номинальным значениям. В данном случае задача разработки метода диагностики окажется полностью идентична с задачей синтеза.

Таким образом, анализ классификаций диагностических методов показал, что наиболее перспективными методами диагностирования ПО являются детерминированные методы, в частности идентификационные. Именно этот класс методов будет рассматриваться как основной в ходе диссертационного исследования.

## **Выводы**

Современные ПО, представляющие собой сложную динамическую систему, могут состоять из элементов различной природы (механических, электрических, электромеханических и т. д.). Каждый из рассматриваемых элементов имеет различные особенности, но в них будет присутствовать составляющая запаздывания выходного сигнала по отношению к входному. Для увеличения достоверности поставленного диагноза технического состояния ПО должны быть выбраны соответствующие методы идентификации и диагностирования.

Исходя из рассмотренных методов идентификации (рис 1.1) при реализации задачи диагностирования целесообразно использование детерминированных методов диагностики, так как они полностью удовлетворяют поставленным целям диагностики: простота, корректность, универсальность.

При разработке новых систем идентификации и диагностирования ПО особое внимание должно быть уделено:

- точности идентификации и достоверности полученной модели объекта,
- определению критериев устойчивости систем автоматического регулирования,
- определению оптимальной стратегии поиска неисправности,
- синтезу автоматизированной системы, включающей в себя разработанные методы идентификации и диагностирования.

## ГЛАВА 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

В настоящее время эксплуатация систем автоматического управления с целью обеспечения установленного качества управления является недопустимой без обеспечения непрерывных процессов диагностирования ПО. Если система автоматического управления используется на объектах, априорная информация о которых является недостаточной для обеспечения необходимого качества управления, то наблюдение за объектом управления в режиме его нормальной эксплуатации может дать дополнительную информацию.

При идентификации ПО одновременно могут быть решены две задачи:

- качественное управление заданным в данное время ПО,
- отображение и учет информации о техническом состоянии ПО.

Обычно при синтезе систем автоматического управления прибегают к различным допущениям в процессе идентификации ПО. При разработке алгоритмов диагностирования ПО любые допущения принятые в процессе идентификации, окажут негативное влияние на диагностическую информацию об исследуемом ПО. Другими словами, точность и глубина идентификации ПО являются основным критерием при синтезе систем диагностирования.

Поэтому внедрение методов вторичной идентификации становится первоочередной задачей для увеличения глубины и достоверности полученного диагноза исследуемой системы.

***Вторичная идентификация*** – идентификация, проводимая с целью уменьшения ошибки идентификации в ходе уточнения числовых значений

структурных параметров исследуемого ПО, полученных в ходе проведения структурной и параметрической идентификации.

## **2.1. Анализ методов идентификации промышленных объектов по результатам анализа коэффициентов дифференциальных уравнений**

Если в исследуемой системе присутствуют только постепенные отказы - изменение структурных параметров во время нормальной работы объекта управления не влечет за собой изменение его математической модели - то по коэффициентам ДУ можно определить значения структурных параметров объекта управления. Зависимость структурных параметров от ДУ можно определить решая систему нелинейных алгебраических уравнений.

В настоящее время известно множество методов [47-59] определения числовых значений коэффициентов ДУ, а следовательно и значений структурных параметров исследуемых ПО, которые соответствуют целям и задачам исследований.

Рассмотрим один из них [55-57]. Данный метод основан на следующем предположении. Если во время исследования ПО, выходной процесс которого может быть представлен в виде суммы частных решений, образующих *фундаментальную систему решений*, известна структура ДУ, то нахождение значений коэффициентов ДУ сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Для получения уравнений, входящих в систему, необходимо заменить функцию  $y(t)$  и ее производные на численные значения, полученные в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  переходного процесса.

*Фундаментальная система решений* – это множество линейно независимых векторов  $\overline{a}_1, \overline{a}_2, \dots, \overline{a}_n$ , каждый из которых является решением однород-



ной системы, кроме того, решением также является линейная комбинация данных векторов  $c_1 \overline{a_1} + c_2 \overline{a_2} + \dots + c_n \overline{a_n}$ , где  $c_1, c_2, \dots, c_n$  – произвольные действительные числа.

Реализация данного метода выглядит следующим образом [56]. Предположим, что объект исследования описывается следующим ДУ:

$$y^{(n)} + \sum_{i=n-1}^0 \alpha_i y^{(i)} = 0. \quad (2.1)$$

Для нахождения численных значений функции  $y(t)$  и её производных необходимо определить

$$y(t_k), y^{(1)}(t_k), \dots, y^{(n)}(t_k), k = \overline{1, n}. \quad (2.2)$$

Подставив значения (2.2) в ДУ (2.1), получим систему уравнений

$$y^{(n)}(t_k) + \sum_{i=n-1}^0 \alpha_i y^{(i)} = 0, k = \overline{1, n}. \quad (2.3)$$

Для определения искоемых коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  необходимо решить систему (2.3).

Погрешность значений коэффициентов будет зависеть от множества факторов, поэтому погрешность определения коэффициентов ДУ для каждого объекта исследований необходимо определять в ходе проведения экспериментов и вычислений.

Рассмотрим данный метод в диссертационной работе [55] для ПО второго порядка, т.к. они являются наиболее распространённым классом объектов, динамику которых можно описать ДУ следующего вида:

$$y''(t) + \alpha_1 y'(t) + \alpha_0 y(t) = 0. \quad (2.4)$$

При решении данного уравнения может быть получено два разных решения.

### 1. Корни характеристического уравнения вещественные

Если при решении были получены только вещественные корни, т.е. сопряженно-комплексных корней нет, тогда в случае не кратных корней решение может быть представлено в следующем виде:

$$y(t) = c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t}.$$

Согласно рассмотренному методу [55] получим систему алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} c_1 \alpha_1^2 e^{\alpha_1 t_1} + c_2 \alpha_2^2 e^{\alpha_2 t_1} + \alpha_1 (c_1 \alpha_1 e^{\alpha_1 t_1} + c_2 \alpha_2 e^{\alpha_2 t_1}) + \\ + \alpha_0 (c_1 e^{\alpha_1 t_1} + c_2 e^{\alpha_2 t_1}) = 0; \\ c_1 \alpha_1^2 e^{\alpha_1 t_2} + c_2 \alpha_2^2 e^{\alpha_2 t_2} + \alpha_1 (c_1 \alpha_1 e^{\alpha_1 t_2} + c_2 \alpha_2 e^{\alpha_2 t_2}) + \\ + \alpha_0 (c_1 e^{\alpha_1 t_2} + c_2 e^{\alpha_2 t_2}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Если у системы (2.5) определитель не будет равен нулю, то система имеет только одно решение. Определитель можно найти по следующей формуле:

$$\Delta = \begin{vmatrix} c_1 \alpha_1 e^{\alpha_1 t_1} + c_2 \alpha_2 e^{\alpha_2 t_1} & c_1 e^{\alpha_1 t_1} + c_2 e^{\alpha_2 t_1} \\ c_1 \alpha_1 e^{\alpha_1 t_2} + c_2 \alpha_2 e^{\alpha_2 t_2} & c_1 e^{\alpha_1 t_2} + c_2 e^{\alpha_2 t_2} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) может быть представлено в скалярном виде:

$$\Delta = c_1 c_2 (\alpha_1 - \alpha_2) e^{\alpha_1 t_1 + \alpha_2 t_1} (e^{(\alpha_1 - \alpha_2)(t_1 - t_2)} - 1). \quad (2.7)$$

Если в исследуемом объекте соблюдается условие о наличии всех частных решений фундаментальной системы, то есть все решения могут быть определены, тогда  $c_1$  и  $c_2$  не равны нулю. Зная, что  $(\alpha_1 - \alpha_2)(t_1 - t_2) \neq 0$ , можно сделать вывод, что  $e^{(\alpha_1 - \alpha_2)(t_1 - t_2)} \neq 1$ . Тогда  $\Delta \neq 0$ .

2. Корни характеристического уравнения сопряженно-комплексные.

Если при решении ДУ (2.4) были получены сопряженно-комплексные корни вида  $x_{1,2} = \alpha \pm \beta$ , тогда решение уравнения (2.4) примет вид

$$y(t) = c_1 e^{\alpha t} \cos \beta t + c_2 e^{\alpha t} \sin \beta t. \quad (2.8)$$

Согласно рассмотренному методу [55] получим систему алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} & e^{\alpha t_1} [(c_2 \alpha^2 - 2c_1 \alpha \beta + c_2 \beta^2) \sin \beta t_1 + (c_1 \alpha^2 - 2c_2 \alpha \beta + c_1 \beta^2) \cos \beta t_1] + \\ & \quad + a_1 e^{\alpha t_1} [(c_2 \alpha - c_1 \beta) \sin \beta t_1 + (c_1 \alpha - c_2 \beta) \cos \beta t_1] + \\ & \quad + a_0 e^{\alpha t_1} [c_1 \cos \beta t_1 + c_2 \sin \beta t_1] = 0; \\ & e^{\alpha t_2} [(c_2 \alpha^2 - 2c_1 \alpha \beta + c_2 \beta^2) \sin \beta t_2 + (c_1 \alpha^2 - 2c_2 \alpha \beta + c_1 \beta^2) \cos \beta t_2] + \\ & \quad + a_1 e^{\alpha t_2} [(c_2 \alpha - c_1 \beta) \sin \beta t_2 + (c_1 \alpha - c_2 \beta) \cos \beta t_2] + \\ & \quad + a_0 e^{\alpha t_2} [c_1 \cos \beta t_2 + c_2 \sin \beta t_2] = 0. \end{aligned} \right\} (2.9)$$

Исходя из вышесказанного, найдем определитель. Если определитель будет не равен нулю, тогда система (2.9) будет иметь единственное решение.

$$\Delta = \begin{vmatrix} e^{\alpha t_1} [(c_2 \alpha - c_1 \beta) \sin \beta t_1 + (c_1 \alpha + c_2 \beta) \cos \beta t_1], & e^{\alpha t_1} [c_1 \cos \beta t_1 + c_2 \sin \beta t_1] \\ e^{\alpha t_2} [(c_2 \alpha - c_1 \beta) \sin \beta t_2 + (c_1 \alpha + c_2 \beta) \cos \beta t_2], & e^{\alpha t_2} [c_1 \cos \beta t_2 + c_2 \sin \beta t_2] \end{vmatrix} \quad (2.10)$$

Вычислим определитель уравнения (2.10)

$$\Delta = -\beta (c_1^2 + c_2^2) e^{\alpha(t_1+t_2)} \sin \beta (t_1 - t_2).$$

Для того чтобы определитель был отличным от нуля, необходимо соблюдение условия  $\sin \beta (t_1 - t_2) \neq 0$  или  $t_1 - t_2 \neq \frac{\pi}{\beta} l, l \in R$ , где  $R$  – множество действительных чисел.

Следовательно, метод определения структурных параметров во время нормальной работы ПО по численным значениям коэффициентам ДУ позволяет провести идентификацию с достаточно большой точностью. Но данный метод не учитывает влияния запаздывания на выходной процесс в ОД. Поэтому данный метод требует существенной доработки.

## 2.2. Влияние запаздывания на результат идентификации промышленных объектов

Влияние запаздывания на работу ПО рассматривается во многих источниках [60-66]. Все реальные ПО имеют запаздывание выходного сигнала, отно-

сительно управляющего воздействия. Это связано со множеством факторов , в том числе:

- Передача сигнала на расстояние (транспортное запаздывание),
- Временем реакции ПО на управляющее воздействие (информационное запаздывание),
- Неточное расположение датчиков на конвейерных линиях.

Необходимость учета запаздывания зависит от целей проведения исследования ПО, относительной величины запаздывания для исследуемых ПО.

Существует достаточно много различных [67-78] методов идентификации ПО с запаздыванием:

- звеном первого порядка;
- метод Ольденбурга-Сарториуса;
- метод Андерсона;
- графоаналитический метод;
- метод интегральных площадей;
- метод Стрейца и другие.

Необходимо отметить, что применение этих методов позволяет производить как структурную, так и параметрическую идентификацию. Рассматривать все перечисленные методы не имеет смысла, т.к. они достаточно хорошо изучены и апробированы. Более подробно рассмотрим только один из перечисленных выше методов – метод Стрейца.

Использование данного метода рационально в том случае, когда исследуемый ПО может быть представлен в виде передаточной функции, состоящей из  $n$ -звеньев с одинаковой постоянной времени  $T$ :

$$W = \frac{ke^{-\tau p}}{(Tp+1)^n},$$

где  $k$  – коэффициент усиления,  $\tau$  – постоянная запаздывания,  $T$  – постоянная времени,  $n$  – порядок функции.

После получения графика реакции на ступенчатое воздействие необходимо определить численные значения  $\tau$  и  $T$ . Для этого нужно в полученном графике провести касательную к точке перегиба, как показано на рис. 2.1.

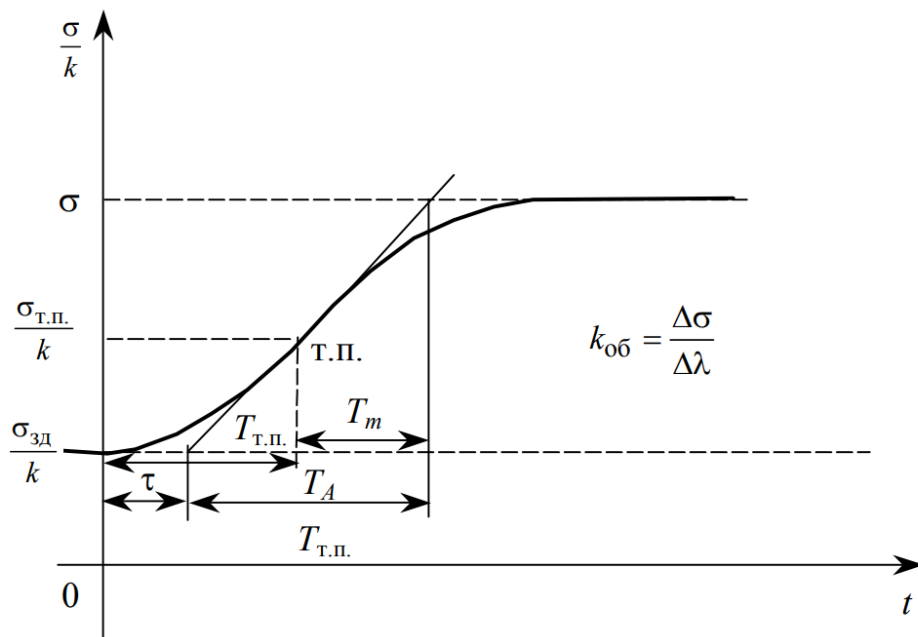


Рис. 2.1. График зависимости постоянных запаздывания  $\tau$  и времени  $T$  методом Стрейца

В табл. 2.1 приведена зависимость  $n$  от времен  $\tau$ ,  $T_a$  и  $T$ , а на рис. 2.2 показано влияние значения  $n$  на переходную характеристику объекта.

Значения и формулы постоянных времени и  $n$ . Таблица 2.1.

$n$	$T_a/\tau$	$T_m/T_a$	$\tau/T$	$T_a/T$	$T_{пл.}/T$	$\sigma(T_{пл.})/T$
1		1	0	1	0	0
2	9,65	0,74	0,28	2,72	1	0,26
3	4,59	0,68	0,81	3,70	2	0,32
4	3,13	0,65	1,43	4,46	3	0,35
5	2,44	0,63	2,10	5,12	4	0,37
6	2,03	0,62	2,81	5,70	5	0,38
7	1,75	0,61	3,55	6,23	6	0,39
8	1,56	0,60	4,31	6,71	7	0,40
9	1,42	0,59	5,08	7,17	8	0,41
10	1,29	0,59	5,87	7,59	9	0,42

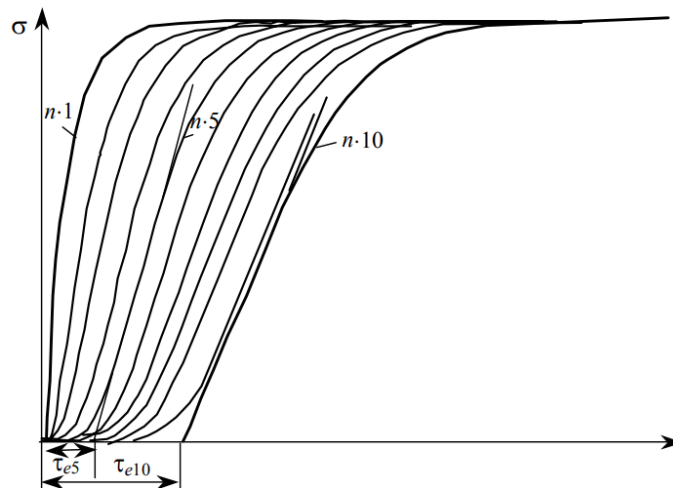


Рис. 2.2. График влияния числа звеньев на постоянные времени  $T$  и запаздывания  $\tau$

Алгоритм идентификации ПО методом Стрейца может быть представлен следующим образом:

- 1) по экспериментальному графику реакции системы на возмущающие воздействия находятся  $\tau$  и  $T_a$ ;
- 2) находится значение  $\tau/T_a$  и по таблице определяется количество звеньев  $n$ ;

3) по результатам предыдущих вычислений при помощи формул, представленных в табл. 2.1 определяется  $T$ ;

4) в случае, если в отношении  $\tau/T_a$  будет получен промежуточный результат для табл. 2.1, значение  $n$  округляются в меньшую сторону.

Недостатком данного метода, как и любых других графических методов, является сложность в определении точки перегиба в переходной характеристике.

Этот метод может быть использован для ПО с чистым запаздыванием меньше чем 30% от постоянной времени. В этом случае запаздывание может быть определено следующим образом

$$\tau = \tau_0 + \tau_e,$$

где  $\tau_0$  – время чистого запаздывания,  $\tau_e$  – время емкостного запаздывания.

Время емкостного запаздывания может быть определено по табл. 2.1.

После проведения идентификации, когда будут определены структура математической модели ПО и значения его структурных параметров, необходимо проверить соответствие полученной модели и реального ПО. В том случае если расхождение превысит допустимую точность, необходимо воспользоваться дополнительными методами идентификации, позволяющими повысить качество полученной модели за счет уточнения значений параметров полученной модели.

### 2.3. Метод вторичной идентификации

Процесс идентификации условно можно разделить на следующие этапы:

1. Структурная идентификация, где определяется математическая модель исследуемого ПО. Математическая модель может быть получена из литературных источников или в ходе математических вычислений.
2. Параметрическая идентификация, где определяются численные значения коэффициентов полученной математической модели.
3. Вторичная идентификация, где достигается требуемая точность идентификации в ходе уточнения численных значений переменных математической модели.

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.

Автором был разработан метод вторичной идентификации, который заключается в минимизации ошибки идентификации. **Ошибка идентификации** – отличие, расхождение, между передаточными функциями полученными в ходе проведения эксперимента и расчетным путем. Определение ошибки идентификации осуществляется суммарной абсолютной погрешностью

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

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



Значение ошибки идентификации определяется величиной относительной ошибки

$$\Delta = \frac{S_m}{\sum_{i=1}^n |h_p(t_i)|} \cdot 100\%.$$

Метод вторичной идентификации может быть реализован в соответствии положениями, изложенными в работах [58,78-80], и с программой [81].

Программная среда MatLab позволяет построить структурную схему ПО.

При этом необходимо:

1. Создать Simulink модель объекта идентификации, полученную после проведения первичной идентификации.
2. Учесть управляющее воздействие. Если оно типовое, воспользоваться предложенными блоками воздействий (ступенчатое, импульсное, синусоиды и др). Если воздействие сложное, необходимо создать отдельный файл с массивом данных, соответствующих этому воздействию.
3. Перенести в MatLab экспериментальную переходную характеристику.
4. Сравнить графики экспериментальных и расчетных переходных характеристик.
5. Вычислить интегральную ошибку идентификации.

В качестве примера предлагается рассмотреть реализацию ПО, представленного передаточным звеном 3-го порядка с запаздыванием. Схема объекта идентификации в среде Simulink изображена на рис. 2.3.

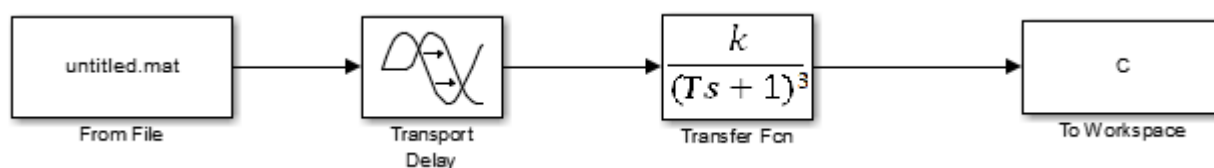


Рис. 2.3 Схема объекта идентификации

В данной схеме в качестве запаздывания предлагается использовать операторное изображение

$$e^{-\tau p},$$

где  $\tau$  – постоянная запаздывания.

Алгоритм вторичной идентификации может быть представлен блок-схемой (рис. 2.4). В данном случае предполагается наличие двух переменных: постоянной времени  $T$  и постоянной запаздывания  $\tau$ . Если в исследуемой схеме присутствует больше переменных, тогда необходимо в блок-схему ввести дополнительные циклы для каждой новой переменной.

В диссертационном исследовании были рассмотрены ПО с запаздыванием, поэтому блок-схема приведена именно для этого класса объектов.

В ходе проведения вторичной идентификации определяются оптимальные значения коэффициентов и интегральная ошибка. При необходимости выводятся графики зависимости погрешности идентификации от значений коэффициентов передаточных функций в трехмерном пространстве.

В процессе нахождения подходящих значений постоянных времени записываются значения погрешностей для каждой пары параметров, строится трехмерный график (рис. 2.5), по которому можно проследить зависимость погрешности от значений коэффициентов передаточных функций. Этот график позволяет визуализировать зависимость и самостоятельно отобрать дополнительные пары с подходящим значением погрешности идентификации.

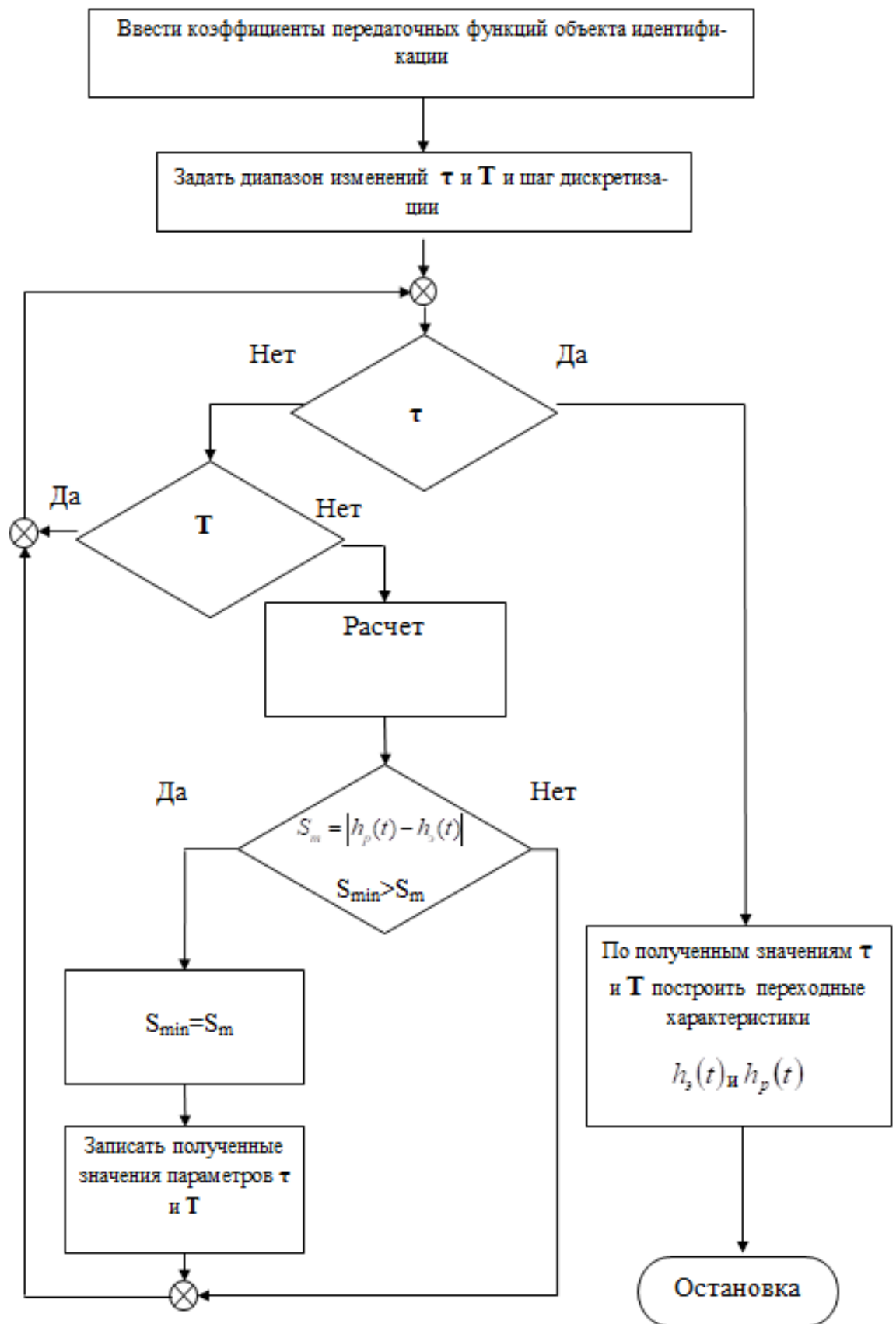


Рис 2.4. Блок-схема алгоритма вторичной идентификации

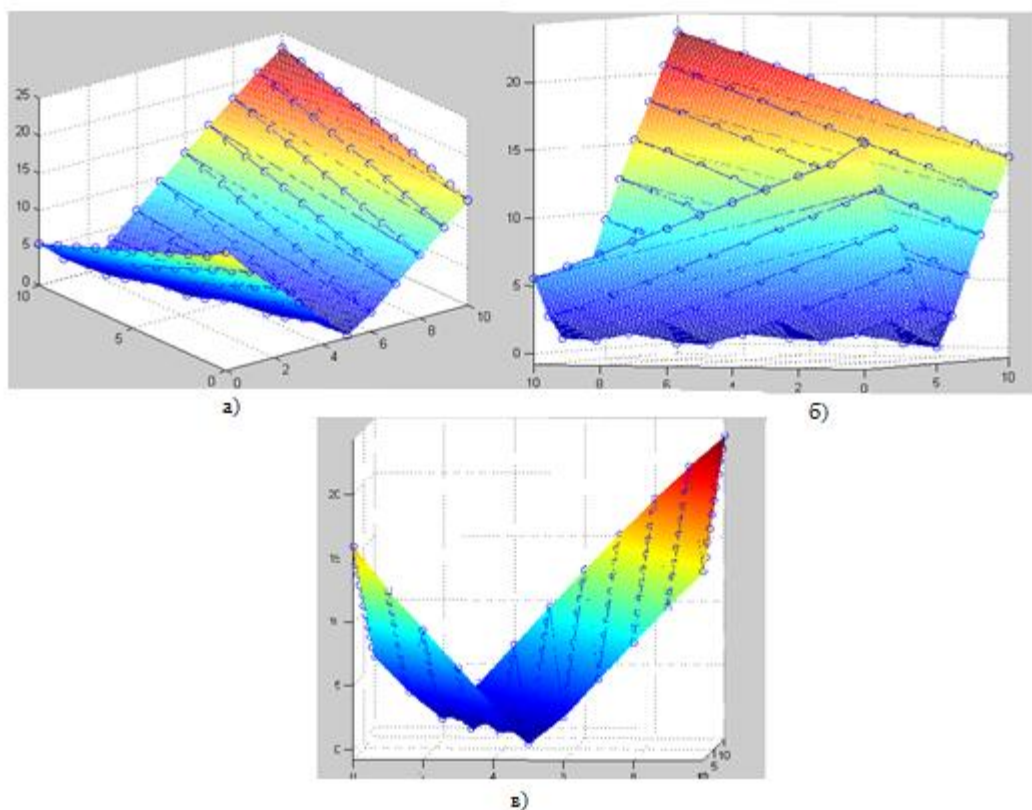


Рис. 2.5. Пример трехмерных графиков

#### 2.4. Идентификация динамики разгона гидрогенератора

При проведении идентификации гидрогенератора в первую очередь необходимо провести структурную идентификацию, как показано в главе 1. Передаточная функция будет иметь вид [82-85]

$$W_g(p) = \frac{1}{Tp+1}.$$

Для получения более достоверной информации необходимо учитывать явление запаздывания в ПО. Для этого нужно в передаточную функцию добавить время запаздывания  $\tau$  [55, 58]

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

Функция  $e^{-\tau p}$  может быть представлена разложением в ряд Маклорена

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

Для получения аналитического решения полученной переходной характеристики можно ограничиться несколькими членами ряда. Процесс нахождения необходимого количества членов ряда Маклорена осуществляется посредством метода вторичной идентификации.

На рис. 2.6 представлена экспериментальная переходная характеристика САР гидрогенератора Братской ГЭС. Следует отметить, что данная кривая разгона получена при пуске гидротурбины с управляющим воздействием после капитального ремонта (рис. 2.7).

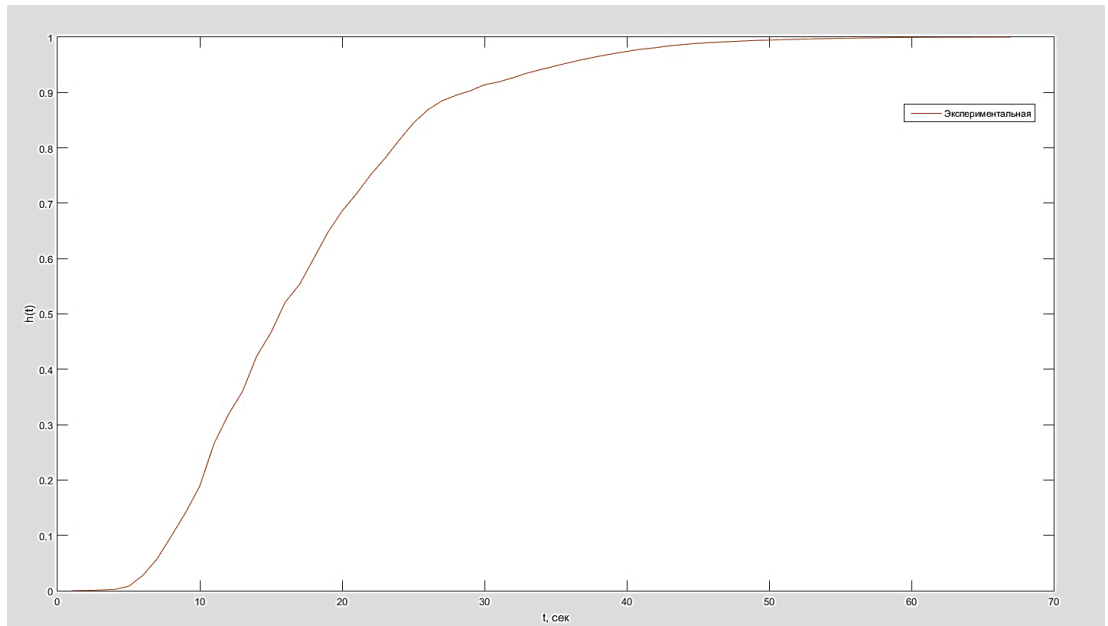


Рис. 2.6. Экспериментальная характеристика динамики САР гидрогенератора Братской ГЭС

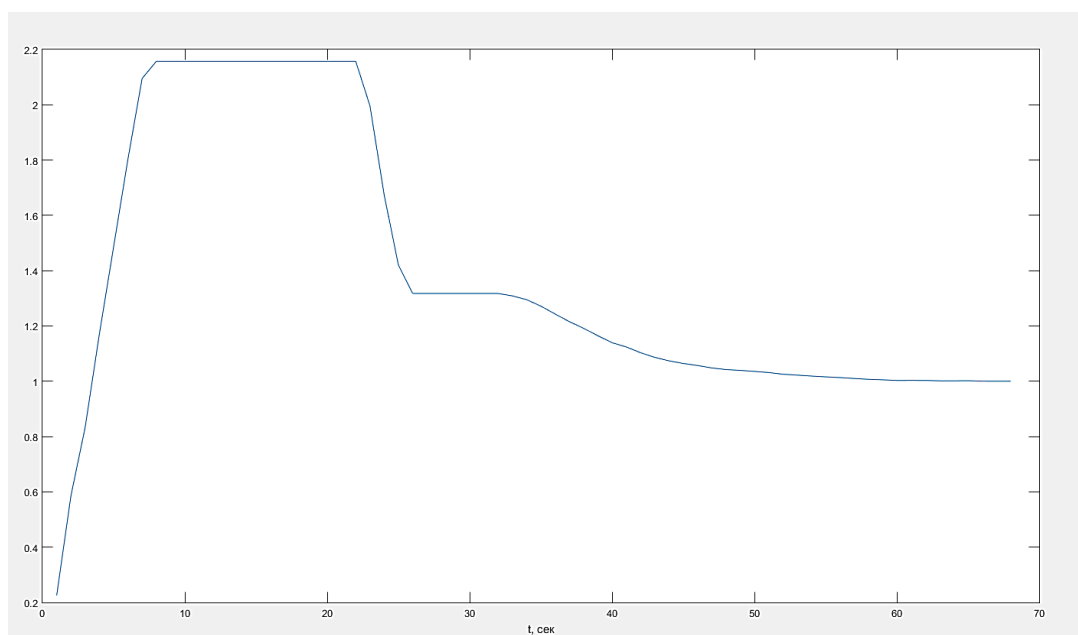


Рис. 2.7. Характеристика управляющего воздействия

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%.

Результаты идентификации приведены на рис. 2.8, где 1 – экспериментальные данные, 2 – метод n-го порядка (метод Стрейца), 3 – метод интегральных площадей, 4 – звеном первого порядка с запаздыванием.

Последняя пара параметров дает лучший результат, поэтому вторичная идентификация должна проводиться в пределах вторых параметров.

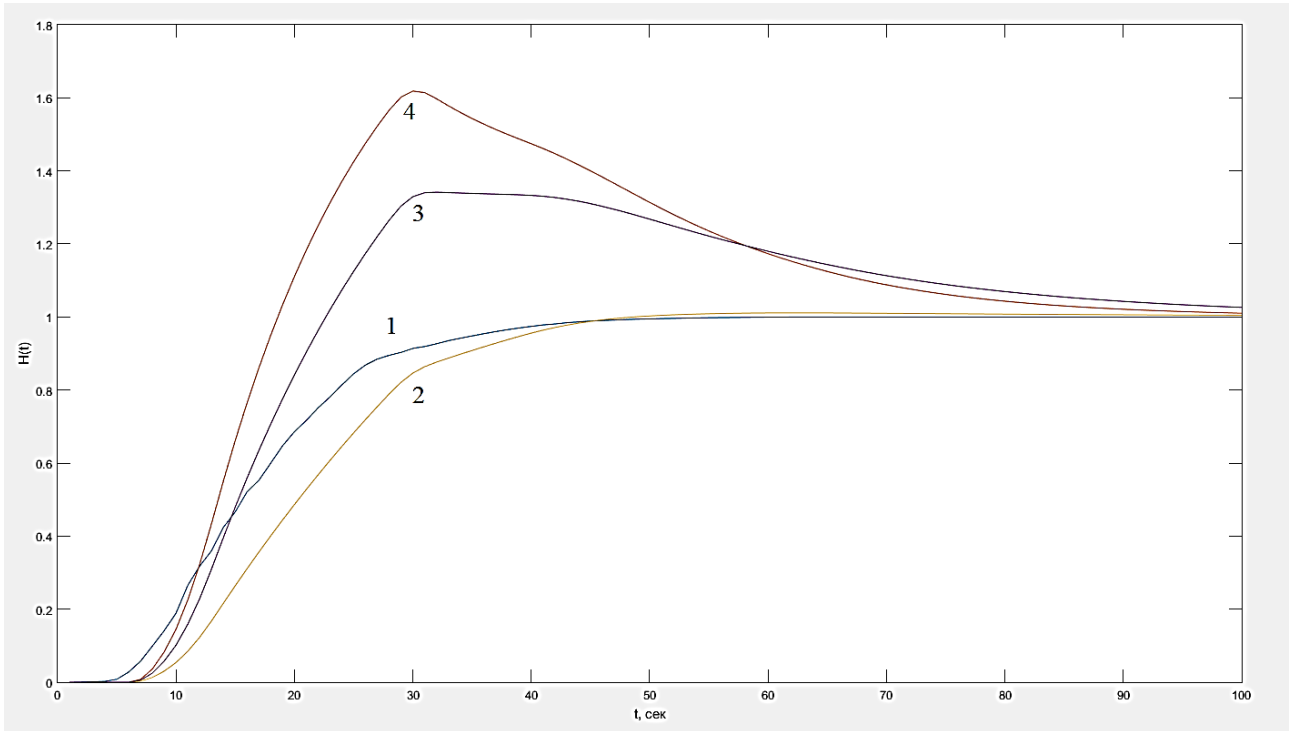


Рис. 2.8. Переходные характеристики динамики гидрогенератора передаточной функцией  $W_g$  разными способами

При замене составной запаздывания рядом Макларена двумя и тремя его членами были получены передаточные функции [86-90]:

$$W_{g_1}(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(\tau_1 p + 1)};$$

$$W_{g_2}(p) = \frac{1}{(T_2 p + 1)(\tau_2 p + \frac{\tau_2^2 p^2}{2} + 1)}.$$

Как показали расчеты, дальнейшее увеличение числа членов ряда не приводит к существенному увеличению точности идентификации, поэтому для задачи идентификации и диагностирования целесообразно ограничиться тремя членами ряда.

После проведения вторичной идентификации были определены постоянные времени для передаточной функции  $W_{g_1}$  -  $T_1 = 41$  с,  $\tau_1 = 0,6$  с, а ошибка идентификации составила 1,73%. На рис. 2.9 и в табл. 2.2 представлены результаты идентификации, где  $H_s(t)$  и  $H_p(t)$  соответственно экспериментальная и

расчетная переходные характеристики. На рис. 2.10 представлены 3D графики зависимости погрешностей от постоянных времени.

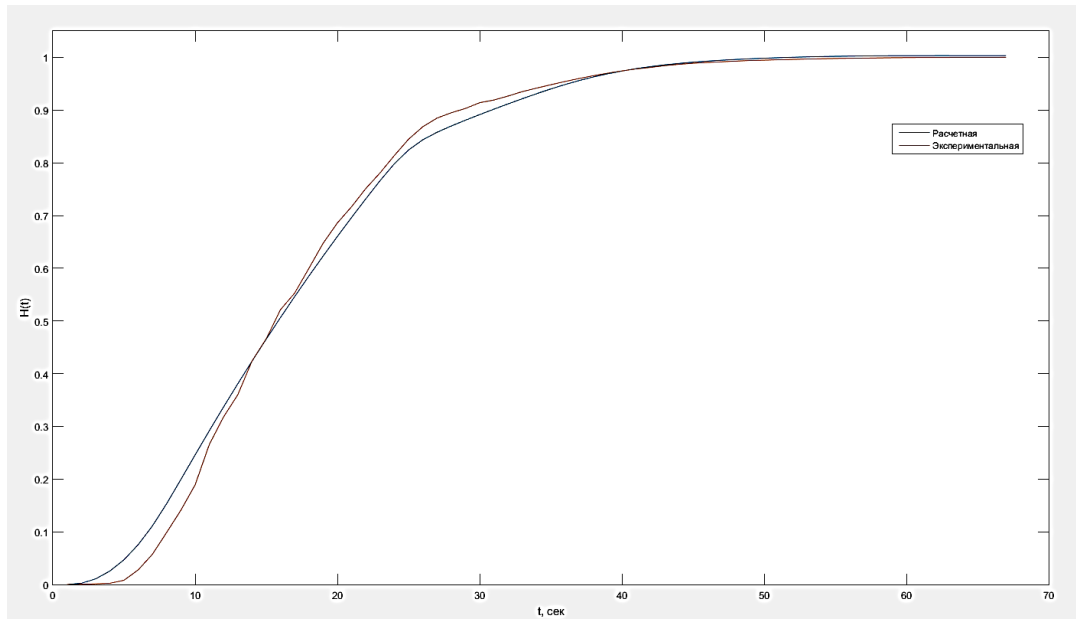


Рис. 2.9. Идентификация динамики гидрогенератора передаточной функцией  $W_{gl}$

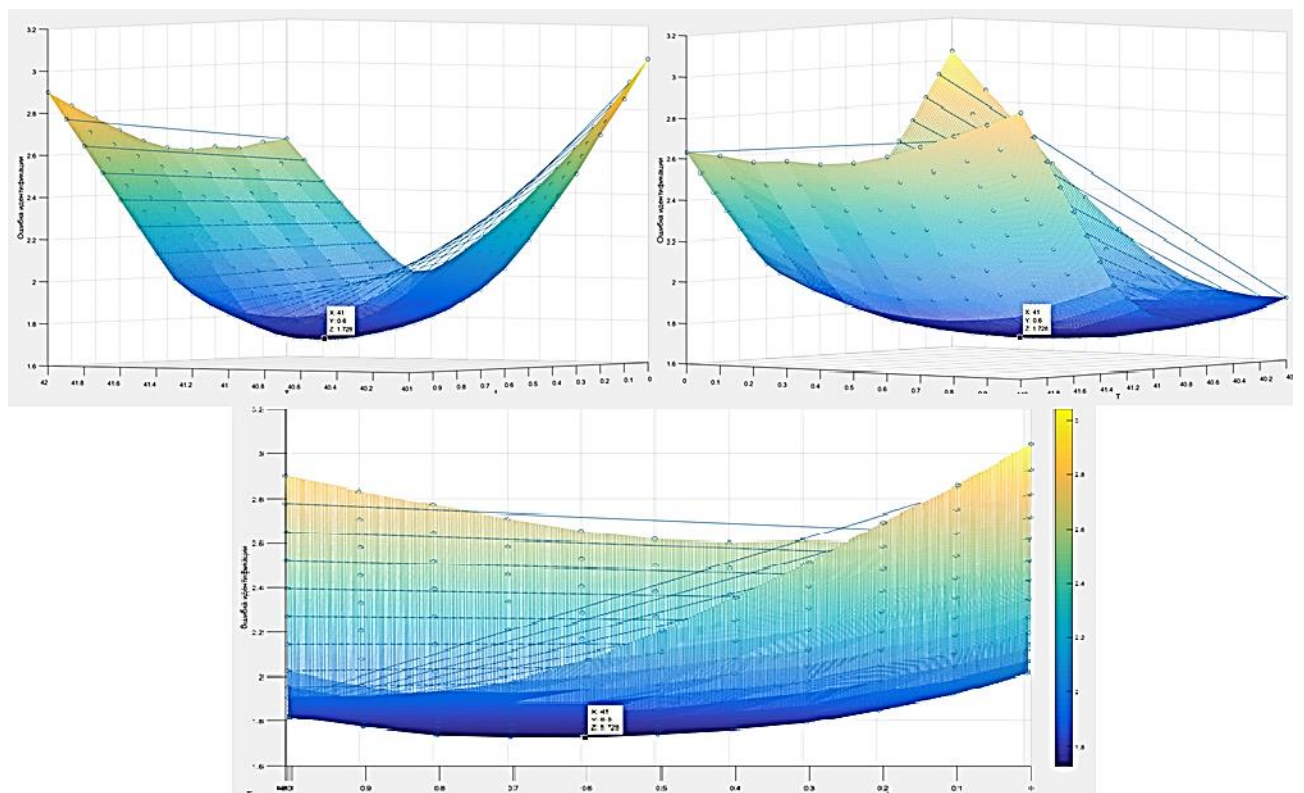


Рис. 2.10. Графики зависимости погрешности от постоянных времени для передаточной функции  $W_{gl}$



Результаты идентификации функцией  $W_{g1}$  Таблица 2.2

t, сек	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$H_3(t)$	0	0,008	0,189	0,466	0,686	0,845	0,914	0,948	0,974	0,989	0,995	0,998	0,999	1
$H_p(t)$	0	0,047	0,246	0,465	0,66	0,824	0,894	0,94	0,974	0,991	0,998	1	1	1
$ H_3(t) - H_p(t) $	0	0,039	0,057	0,001	0,026	0,021	0,02	0,008	0	0,002	0,003	0,002	0,001	0

Также были определены постоянные времени для второй передаточной функции  $W_{g2}$  -  $T_2 = 40,9$  с,  $\tau_2 = 0,8$  с. Ошибка идентификации  $S=1,69\%$ . На рис. 2.11 и 2.12 изображены графики переходных процессов и в табл. 2.3 представлены результаты идентификации.

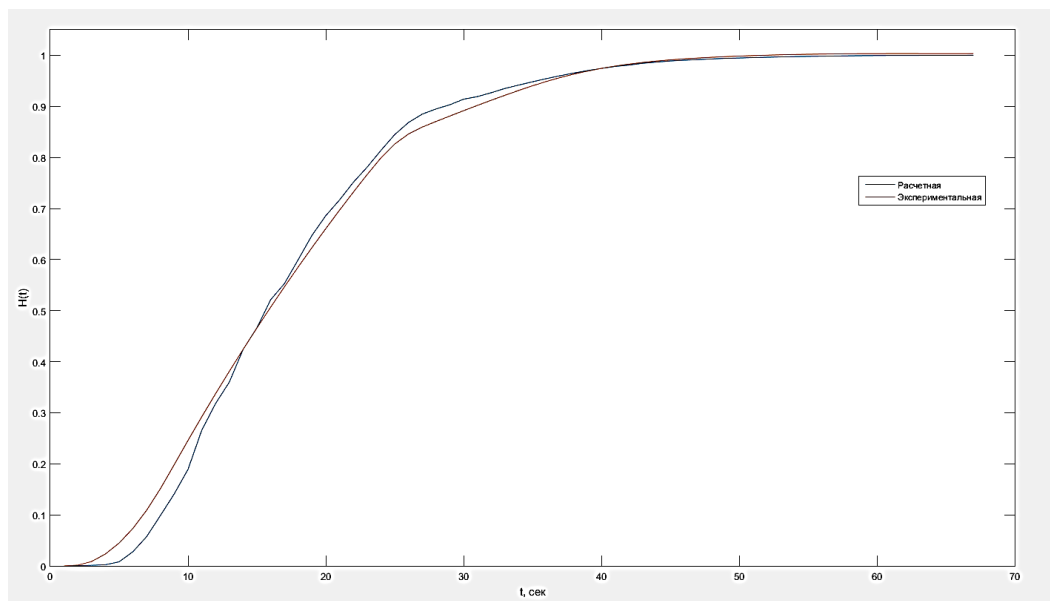


Рис. 2.11. Результат идентификация динамики гидрогенератора передаточной функцией  $W_{g2}$

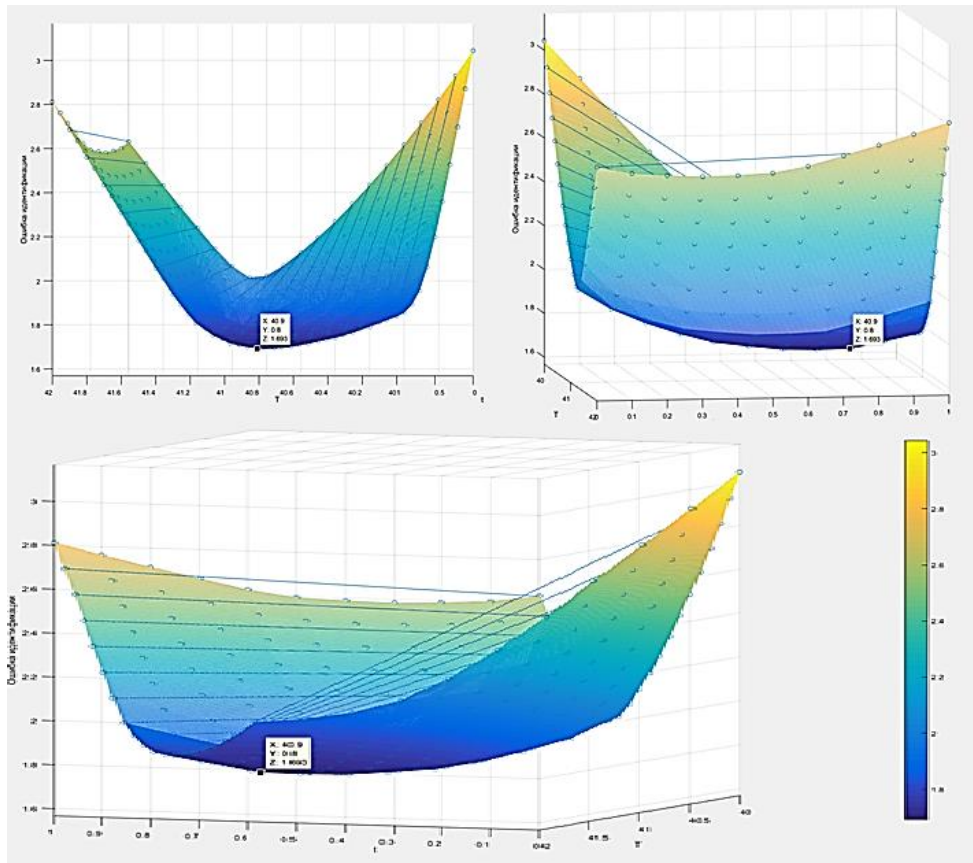


Рис. 2.12. Графики зависимости погрешности от постоянных времени для передаточной функции  $W_{g2}$

Результаты идентификации функцией  $W_{g2}$  Таблица 2.3.

t, сек	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$H_3(t)$	0	0,008	0,189	0,466	0,686	0,845	0,914	0,948	0,974	0,989	0,995	0,998	0,999	1
$H_P(t)$	0	0,044	0,246	0,466	0,661	0,826	0,891	0,940	0,974	0,991	0,998	1	1	1
$ H_3(t) - H_P(t) $	0	0,036	0,057	0	0,025	0,019	0,023	0,008	0	0,002	0,003	0,002	0,001	0

В результате проведения идентификации гидрогенератора разработанным методом вторичной идентификации была значительно увеличена точность идентификации, с 4,82% (метод Стрейца) до 1,69%. Также обоснована замена составной запаздывания на разложение в ряд Маклорена и определено оптимальное количество членов ряда.

## 2.5. Идентификация динамики линейной стационарной САР скорости двигателя постоянного тока

Структурная схема линейной стационарной САР скорости двигателя постоянного тока (ДПТ) представлена на рис. 2.13 [91].

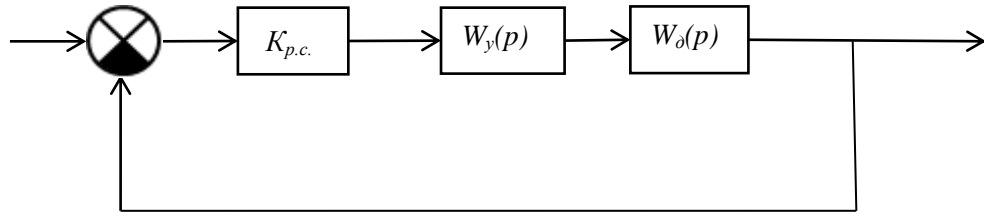


Рис. 2.13. Структурная схема линейной стационарной САР скорости ДПТ

Если переходную характеристику ДПТ аппроксимировать передаточной функцией аperiodического звена 2-го порядка, то передаточная функция линейной стационарной САР скорости ДПТ будет иметь вид

$$W(p) = \frac{K_{p.c.}}{K_{p.c.} + (T_{d1}p + 1)(T_{d2}p + 1)(T_y p + 1)}, \text{ или}$$

$$W(p) = \frac{K_{p.c.}}{T_{d1}T_{d2}T_y p^3 + (T_{d1}T_y + T_{d2}T_y)p^2 + (T_{d1} + T_{d2} + T_y)p + 1 + K_{p.c.}}, \text{ или} \quad (2.20)$$

$$W(p) = \frac{K_{p.c.}}{\alpha_0 p^3 + \alpha_1 p^2 + \alpha_2 p + \alpha_3},$$

где  $K_{p.c.} = K_{эу} \cdot K_y \cdot K_d \cdot K_{тг}$  – коэффициент передачи разомкнутой системы;  $K_{эу}$  – коэффициент передачи электронного усилителя;  $K_y$  – коэффициент передачи усилителя мощности;  $K_d$  – коэффициент передачи двигателя;  $K_{тг}$  – коэффициент передачи тахогенератора;  $T_{d1}$  и  $T_{d2}$  – электромеханические постоянные времени двигателя;  $T_y$  – постоянная времени усилителя.

В электромеханических системах при интенсивном подавлении высокочастотной составляющей выделяется низкочастотная составляющая, выполняется условие бифуркации, что позволяет на основании вычислительных экспериментов определить составные параметры высокочастотной и низкочастотной составляющих по экспериментальной переходной характеристике САР скорости ДПТ.

Далее проводятся первичная и вторичная идентификации, сущность и алгоритм которых описан ранее.

Следующим этапом в разработанном алгоритме является определение коэффициентов передаточной функции  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  (2.20). Для решения этой задачи воспользуемся решением системы алгебраических уравнений.

По выражениям (2.20) можно определить зависимости конструктивных параметров  $T_{д1}, T_{д2}, T_y, K_{p.c}$  от коэффициентов передаточной функции.

Составим систему уравнений, позволяющую определить  $T_{д1}, T_{д2}, T_y$

$$\left. \begin{aligned} T_{д1}T_{д2}T_y &= \alpha_0; \\ T_{д1}T_y + T_{д2}T_y + T_{д1}T_{д2} &= \alpha_1; \\ T_{д1} + T_{д2} + T_y &= \alpha_2; \\ K_{p.c} + 1 &= \alpha_3. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Структурные параметры ДПТ  $T_{д1}, T_{д2}, T_y, K_{p.c}$  характеризуют состояние конкретного устройства (рис. 2.13).

На основе описанного выше алгоритма разработан программный комплекс в программной среде MatLab для расчета технологических параметров САР скорости ДПТ, позволяющий оперативно в любой момент времени диагностировать ДПТ в режиме нормального функционирования.

Ниже приводится расчет параметров САР скорости ДПТ в зависимости от изменений экспериментальной переходной характеристики при помощи метода вторичной идентификации.

Система имеет следующие параметры: передаточный коэффициент преобразующего устройства  $K_{p.c}=3,65$ ; электромеханические постоянные времени двигателя  $T_{д1} = 0,1с$ ,  $T_{д2} = 0,72 с$ ; постоянная времени усилителя  $T_y = 0.2 с$ .

Подставив значения параметров в выражение передаточной функции (2.20), найдем  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Передаточная функция САР скорости ДПТ имеет вид

$$W(p) = \frac{3,65}{0.0144p^3 + 0.236p^2 + 1.02p + 4.65} .$$

Будем полагать эту передаточную функцию и заданные параметры номинальными и относительно этих значений можно рассчитать отклонения параметров САР скорости ДПТ.

Значения экспериментальной переходной характеристики  $H(t)$ , САР скорости ДПТ представлены в табл. 2.4.

Значения экспериментальной переходной характеристики Таблица 2.4

t, с	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
H(t)	0	0,243	0,621	0,918	0,972	0,864	0,756	0,718	0,729
t, с	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4
H(t)	0,783	0,81	0,788	0,782	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785

Необходимо определить изменения конструктивных параметров ДПТ.

Переходные характеристики функции САР скорости ДПТ, полученные при проведении первичной идентификации, представлены на рис. 2.14. Суммарная погрешность идентификации составила  $S_m=6,23\%$ .

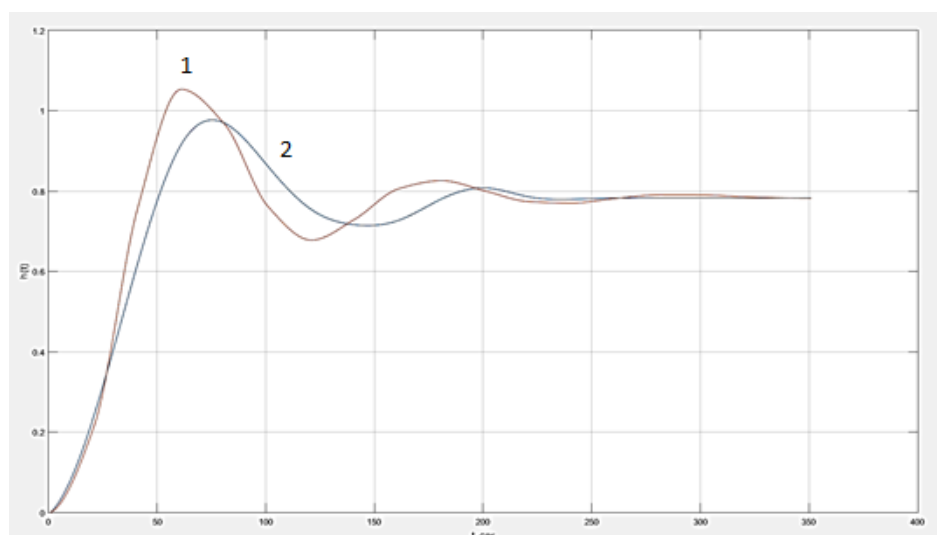


Рис. 2.14. Переходные характеристики САР скорости ДПТ: 1 – расчетная характеристика, 2 – экспериментальная характеристика

Уточнённые коэффициенты, полученные после проведения вторичной идентификации предложенным методом, имеют следующие значения:  $K_{p.c} = 3,65$ ,  $T_{д1} = 0,12$  с,  $T_{д2} = 0,6$  с,  $T_y = 0,14$  с. Уточнённая погрешность составила  $S_m = 1,33\%$ . Графики переходных функций ДПТ с уточнёнными коэффициентами представлены на рис. 2.15. Передаточная функция  $W(p)$  с полученными коэффициентами имеет вид

$$W(p) = \frac{3,65}{0.01008p^3 + 0.1728p^2 + 0.86p + 4.65} \quad (2.22)$$

В табл. 2.5 приведены полученные значения параметров САР скорости ДПТ и их процентные отклонения от номинальных значений.

Значение параметров САР скорости ДПТ Таблица 2.5.

Параметр	$K_{p.c.}$	$T_{д1}$	$T_{д2}$	$T_y$
Номинальное значение	3,65	0,18	0,68	0,12
Вычисленное значение	3,65	0,12	0,6	0,14
Отклонение, %	-	33	11,7	14

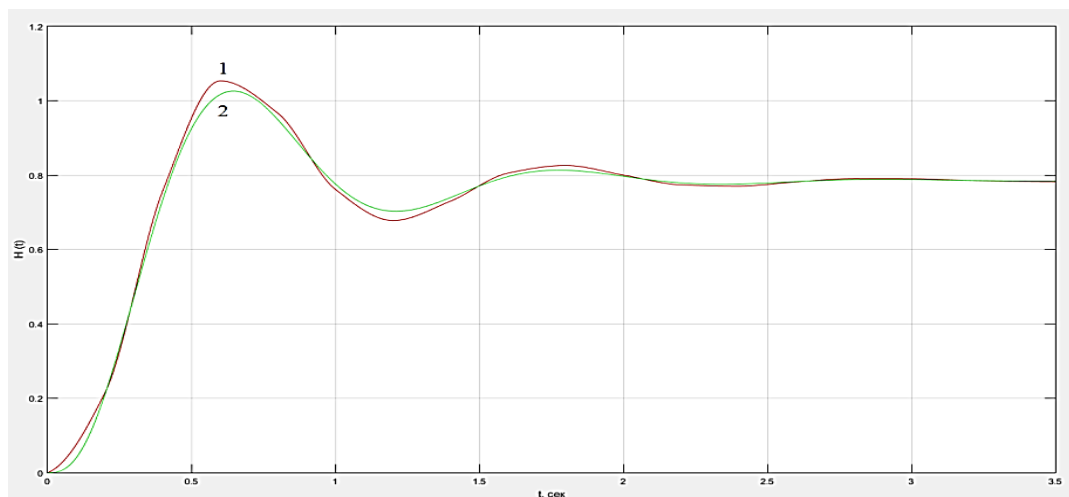


Рис. 2.15. Переходные характеристики САР скорости ДТП при вторичной идентификации: 1 – экспериментальная характеристика, 2 – расчетная характеристика.

По результатам идентификации можно сделать первичный анализ постоянных времени, значения экспериментальной переходной характеристики представлен в табл. 2.4. Как можно заметить, постоянные времени двигателя  $T_{д1}$  и  $T_{д2}$  имеют отклонения в 33% и 11,7%. Очевидно, что данные отклонения негативно влияют на работу исследуемого объекта и ему необходима более детальная диагностика и плановый ремонт.

### Выводы

В результате рассмотрения существующих методов идентификации промышленных объектов с запаздыванием стало очевидно, что большинство из них дают маленькую точность для дальнейшего диагностирования ПО. И все из них исключают процесс автоматизации. Из всего выше сказанного следует, что разработка методов вторичной идентификации, которые позволяют найти значения структурных параметров, не изменив при этом формы математической модели, является актуально и первостепенной задачей идентификации и диагностирования.

1. Большинство ПО, находящихся в эксплуатации, имеют запаздывание в той или иной форме, которое учитывается функцией  $e^{-\tau p}$ . Данная функция может быть представлена в виде разложения в ряды Маклорена, Фурье или Паде. Это дает возможность при структурной идентификации получить большое разнообразие передаточных функций.

2. Разработанный метод вторичной идентификации с учетом реального управляющего воздействия позволяет получить минимальную ошибку идентификации.

3. При параметрической идентификации определяются постоянные времени и время запаздывания, характеризующие состояние ПО и регулятора.

4. При операционном исчислении время запаздывания  $\tau$  учитывается запаздыванием переходной функции.

5. Предложенный метод вторичной идентификации может быть достаточно просто интегрирован в технический процесс функционирования практически любого реального ПО. Он позволяет проводить идентификацию в процессе нормального функционирования системы в режиме реального времени.

На время запаздывания влияет множество факторов, главный из них – техническое состояние ПО. Так как в процессе идентификации по предложенному методу могут быть получены передаточные функции любой сложности, коэффициенты которых зависят от величины времени запаздывания, это существенно увеличивает их диагностическую ценность.



### **ГЛАВА 3. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ЗАПАДЫВАНИЕМ**

В настоящее время существует огромное разнообразие автоматических систем, которые выполняют функции по управлению процессами в самых разных областях промышленности. Современный мир требует грамотного управления различными ПО, в которых отклонение от заданного режима работы может иметь различные негативные последствия: снижение срока службы ПО, полный вывод его из эксплуатации, угроза человеческой жизни. Применение систем автоматического управления дает возможность существенно снизить эти риски только в том случае, если будут учтены все особенности управления данным ПО.

Одним из ключевых факторов управления ПО является критерий устойчивости, который позволяет определить возможность автоматического управления данным объектом. Например, в погоне за улучшением показателей автоматического управления ( время регулирования, перерегулирование) может возникнуть колебательный процесс, который недопустим в режиме нормального функционирования ПО. А с другой стороны мы можем ввести управляемый ПО в режим колебаний для получения некоторых дополнительных характеристик объекта.

Большинство систем автоматического регулирования в своем составе имеют ПИД-регулятор, который позволяет достигнуть заданных критериев управления за оптимальный период времени. Проблема регулирования объек-

тов с гистерезисом и нелинейностями, автоматической настройки и адаптации в условиях действия высокочастотных шумов остается актуальной. Её решение усложняется тем, что зачастую динамика объекта неизвестна, сам объект многосвязен (имеются перекрестные связи между контурами управления), измерения сильно зашумлены (необходима фильтрация сигналов). Поэтому необходимо разработать метод определения настроек ПИД-регулятора, который учитывал бы эти критерии, и был достаточно прост в использовании.

### 3.1. Определение критерия устойчивости систем автоматического регулирования с запаздыванием

Идентификация динамики гидрогенератора достаточно полно представлена во второй главе диссертации и в работах [82-85], а структурная схема регулирования скорости вращения гидроагрегата с пропорциональным регулятором – на рис. 3.1, где  $g(t)$  – входной сигнал;  $k_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$  – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания гидроагрегата;  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $\Theta(t)$  – выходной сигнал.

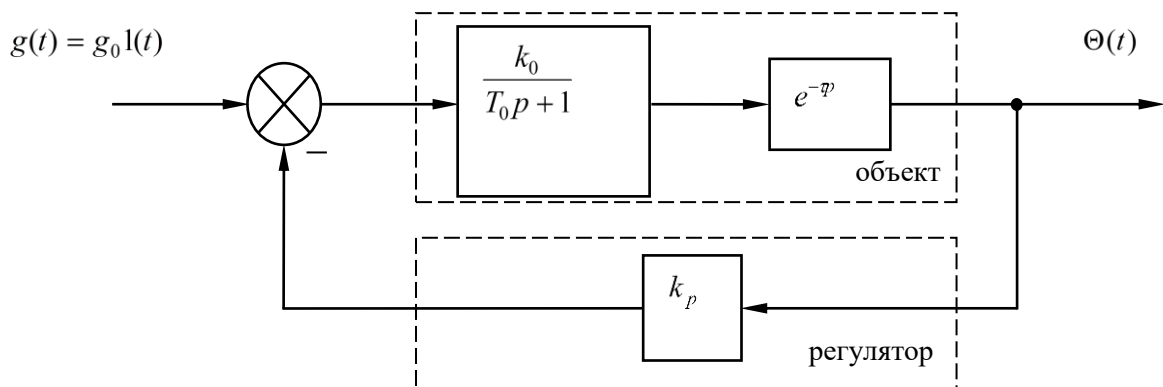


Рис. 3.1. Структурная схема САУ скорости вращения гидроагрегата

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{\tau p + k_p k_0 e^{-\tau p} + 1}. \quad (3.1)$$

ДУ, соответствующее передаточной функции (3.1), будет иметь вид

$$\begin{aligned} x'(t) + \frac{1}{T_0} x(t) + \frac{k_p k_0}{T_0} x(t - \tau) &= \frac{k_0}{T_0} g_0(t - \tau), \quad t \in [0, \infty), \\ x(\xi) &= 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

В работах [92-97] приводится доказательство об устойчивости уравнения

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) + \sum_{k=1}^m H_k(t) x[h_k(t)] &= f(t), \quad t \in [0, \infty), \\ x(\xi) &= 0, \quad \xi < 0, \end{aligned} \quad (3.3)$$

рассматриваемого в предположении, что  $f, H_k(t): [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  – суммируемые на каждом конечном отрезке  $[0, b] \subset [0, \infty)$  функции;  $h_k: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  могут быть измерены,  $h_k(t) \leq t, k=1, 2, \dots, m$  при почти всех  $t \in [0, \infty)$ .

Сформулируем это утверждение в удобной для наших целей форме [95-98].

Пусть существует функция такая  $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$  ( $y(t)=0$  при  $t < a$ ), что выполняется неравенство

$$y(t) \geq \sum_{k=1}^m H_k^+(t) \sigma_{h_k}(t) \exp\left(\int_{h_k(t)}^t y(\xi) d\xi\right). \quad (3.4)$$

Тогда уравнение (3.2) устойчиво.

Здесь  $H_k^+(t)$  – положительная часть функции  $H_k(t), k=1, 2, \dots, m$ .

Заметим, что вместо выполнения неравенства (3.4) в теореме можно потребовать выполнение неравенства

$$\sum_{k=1}^m \int_{h_k(t)}^t H_k(s) \sigma_{h_k}(t) ds \leq \frac{1}{e}. \quad (3.5)$$

Для получения условия устойчивости системы необходимо применить неравенство (3.5) к уравнению (3.2)

$$\frac{\tau}{T_0} \leq \frac{1}{k_p k_0 e}. \quad (3.6)$$

Полученное выражение определяет *наличие в системе неустойчивых явлений*, что в дальнейшем можно использовать как диагностический признак системы.

Для доказательства этого утверждения необходимо получить разные кривые переходных процессов системы, с различными значениями  $k_p$ .

Аналитически решить уравнение (3.2) невозможно [99], нужно разложить  $e^{-tp}$  в ряд Маклорена. Для достижения необходимой точности воспользуемся ограничением ряда Маклорена тремя членами, как показано в главе 2. Тогда передаточная функция (3.1) будет иметь вид

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1) \left( \frac{\tau^2 p^2}{2} + \tau p + 1 \right) + k_0 k_p}. \quad (3.7)$$

При приведении передаточной функции (3.7) к общему виду,

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}, \quad (3.8)$$

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

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

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

Рассмотрим три варианта значений  $k_p$ .

1. При  $k_p=15$  (условие (3.6) не выполняется) передаточная функция примет вид

$$W(p) = \frac{0.06606}{0.1189p^3 + 0.2595p^2 + 0.2748p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 3.2.

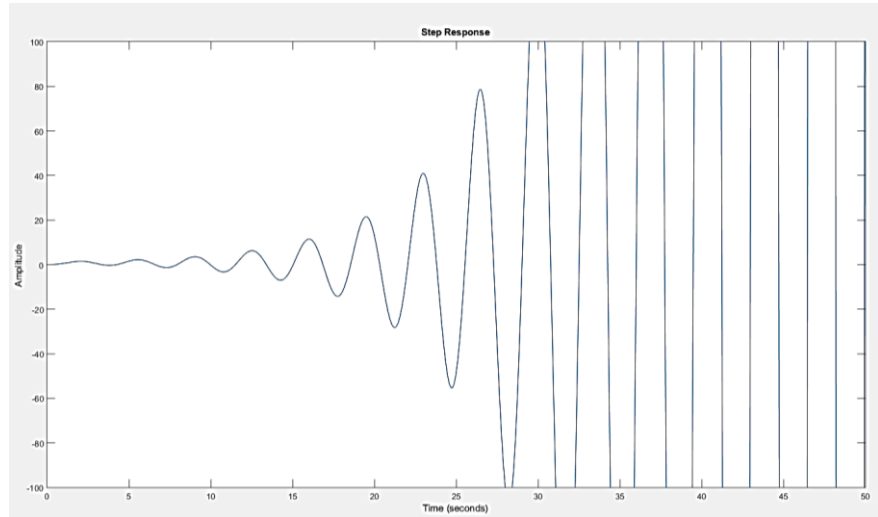


Рис. 3.2. Переходная характеристика при  $k_p=15$

2. При  $k_p=0,15$  (условие (3.6) выполняется) передаточная функция примет вид

$$W(p) = \frac{3.478}{6.259p^3 + 15.8p^2 + 19.94p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 3.3.

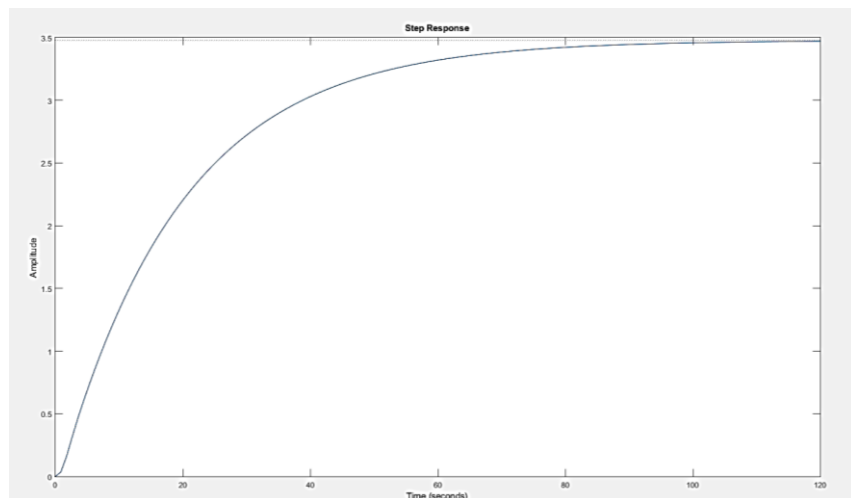


Рис. 3.3. Переходная характеристика при  $k_p=0,15$

3. При  $k_p=0,15*10^{-2}$  (условие (3.6) выполняется) передаточная функция примет вид

$$W(p) = \frac{7.194}{12.94p^3 + 32.68p^2 + 41.25p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 3.4.

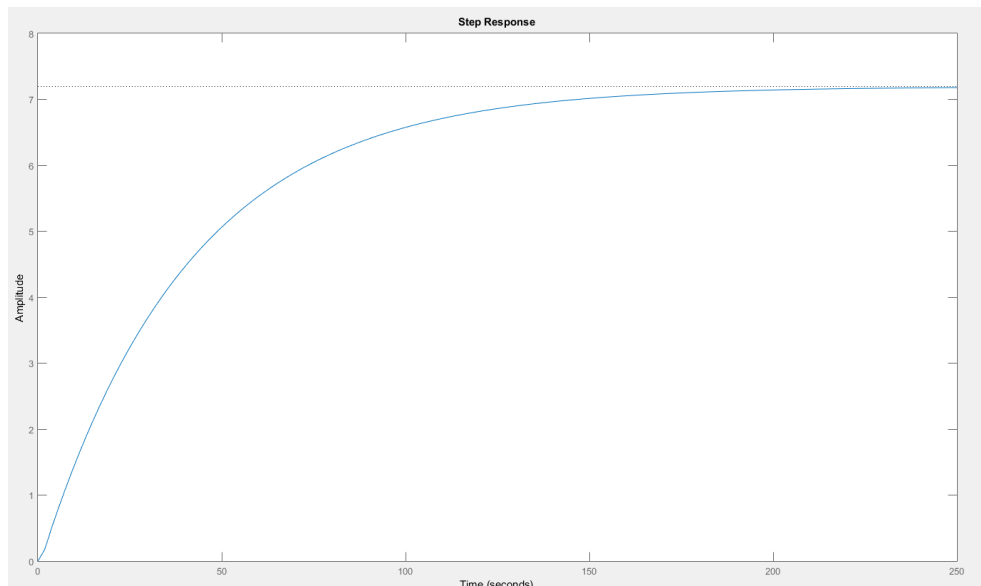


Рис. 3.4. Переходная характеристика при  $k_p=0,15*10^{-2}$

Реальная САР скорости вращения гидроагрегата (рис. 3.5) состоит из последовательно соединенных турбины гидроагрегата, маятника, сервомотора и золотника [97,98], где  $g(t)$  – входной сигнал (напряжение); 1,2,3,4 – соответственно передаточные функции турбины гидроагрегата, маятника, сервомотора и золотника;  $k_1 - k_4$ ,  $T_1 - T_8$ ,  $\tau_1 - \tau_4$  – соответственно их коэффициенты передачи, постоянные времени и время запаздывания;  $\Theta(t)$  – выходной сигнал (скорость вращения).

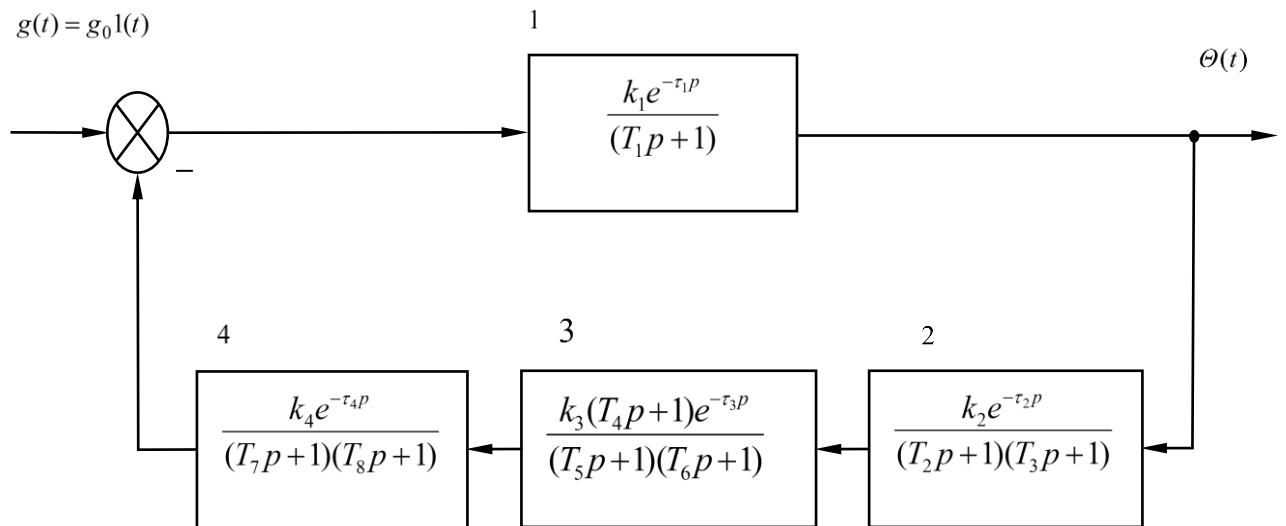


Рис. 3.5. Структурная схема экспериментальной САР скорости вращения гидроагрегата

Так как инерционности и запаздывания гидроагрегата и турбины соизмеримы, а маятника, сервомотора и золотника существенно меньше, то в данной схеме их коэффициентами запаздывания можно пренебречь. Тогда эквивалентная схема САР примет вид, представленный на рис. 3.6 [98].

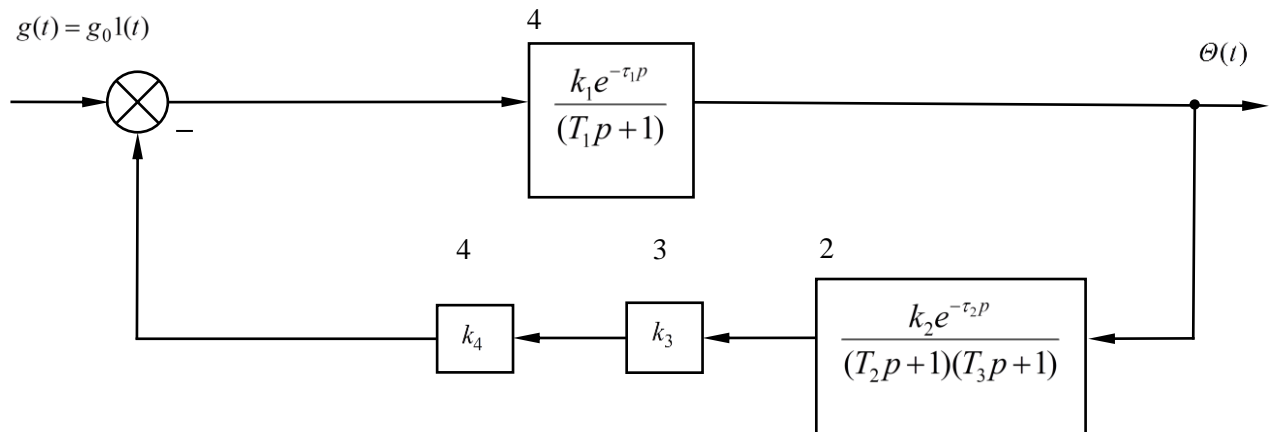


Рис. 3.6. Расчетная схема экспериментальной САР скорости вращения гидроагрегата

При условии что  $k_0 = k_1$  и  $k_p = k_2 k_3 k_4$ , передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W_{p.c}(p) = \frac{k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (3.9)$$

где  $k_0$  и  $k_1$  коэффициенты передачи гидроагрегата,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  коэффициенты передачи регулятора.

Соответственно передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W_{3.c}(p) = \frac{k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}. \quad (3.10)$$

Очевидно, аналитического решения передаточной функции (3.10) не существует. Для получения корректного решения данные характеристики могут быть заменены суммой членов ряда Фурье. Необходимость такой подстановки обуславливается наличием автоколебаний и запаздывания в полученных экспериментальных характеристиках исследуемой системы. При появлении колебаний в системе (рис 3.2) возможно применение колебательных методов диагностирования для таких ПО, в которых колебания в режиме нормального функционирования появляться не могут.



### **3.2. Модальный способ нахождения настроек ПИД-регулятора для промышленных объектов с запаздыванием**

ПИД-регуляторы являются самыми широко используемыми промышленными контроллерами, так как могут обеспечить высокую эффективность управления, несмотря на различные динамические характеристики объекта. В настоящее время порядка 90÷95 % регуляторов, находящихся в эксплуатации [100-102], используют ПИД-алгоритм. К примеру на 84 % предприятий Японии используются ПИД-контроллеры.

Вместе с тем необходимо иметь регулярную процедуру синтеза системы автоматического управления, которая бы позволяла по известной структуре алгоритма регулирования получать конкретные законы изменения параметров ПИД-регулятора на основе результатов экспериментального исследования временных характеристик свободного движения объекта. В наибольшей степени формализованные процедуры синтеза ПИД-регуляторов и их сравнительный анализ на примере решения навигационной задачи (метод обратных задач динамики по критериям оптимального модуля и симметричного оптимума, алгебраический метод) представлены в работах [103,104]. Настройка параметров ПИД-регуляторов на базе микроконтроллеров и АЦП осуществляется по методам Циглера-Николса и Чина-Хронеса-Ресвика, но они имеют ряд существенных недостатков [104-106].

Для объектов с одним входом и одним выходом (технологических модулей в АСУ ТП [106]) предлагается модальный способ определения параметров, который позволяет получить значения коэффициентов ПИД-регулятора исходя из расположения нулей и полюсов регулируемого объекта [107-109]. По экспе-

риментальным характеристикам с ненулевыми начальными условиями определяются параметры ПИД-регулятора таким образом, чтобы характеристики замкнутой системы соответствовали желаемым свойствам апериодического звена с минимальным временем регулирования. При этом предполагается, что объект управления содержит нули только в левой полуплоскости.

Следовательно, поиск параметров ПИД-регуляторов по режимам работы динамического объекта необходимо осуществлять, учитывая все особенности нормального функционирования ПО. Основная цель такого поиска: спроектировать регулятор так, чтобы нули регулятора соответствовали полюсам аппроксимируемого объекта передаточной функции первой или второй степени.

### 3.2.1. Алгоритм ПИД-регулирования

Алгоритм ПИД-регулирования состоит из трех базовых управляющих элементов: пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего. Перед началом настройки ПИД-регулятора важно знать структуру алгоритма ПИД-регулирования. Различают три различных типа алгоритмов: идеальный, серийный (также называемый «взаимодействующий», «аналоговый» или «классический»), параллельный (также называемый «невзаимодействующий», «независимый» или «независимый по связям»). Различие между этими алгоритмами состоит в том, как связи звеньев алгоритма влияют друг на друга.

Выходной сигнал ПИД-регулятора  $u(t)$  равен сумме трех сигналов: сигнал, полученный путем умножения ошибки сигнала на коэффициент пропорционального усиления  $K_p$ , сигнал, полученный путем дифференцирования и умножения ошибки сигнала на коэффициент дифференциальной составляющей  $K_D$ , сигнал, полученный интегрированием и умножением ошибки сигнала на

коэффициент интегрирующего звена  $K_I$ . Выход ПИД-регулятора задается уравнением

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int_0^t e(t) dt$$

или

$$U(p) = K_p E(p) + K_D E(p)p + K_I E(p) \frac{1}{p}, \quad (3.11)$$

которое приводится к виду

$$U(p) = E(p) \left( K_p + K_D p + \frac{K_I}{p} \right). \quad (3.12)$$

Определение нулей передаточной функции в (3.12) имеет вид

$$G_{PID}(p) = K_p + K_D p + \frac{K_I}{p} = \frac{K_D p^2 + K_p p + K_I}{p} = \frac{K_D \left( p^2 + \frac{K_p p}{K_D} + \frac{K_I}{K_D} \right)}{p}. \quad 3.13$$

Уравнение (3.13) представляет собой систему второго порядка с двумя нулями и одним полюсом

$$G_{PID}(p) = \frac{K_D(p+Z_{PI})(p+Z_{PD})}{p} = K_D(p+Z_{PI}) \frac{p+Z_{PD}}{p} = G_{PD}(p)G_{PI}(p). \quad 3.14$$

Передаточная функция (3.14)  $G_{PID}$  через нули характеристического уравнения (3.13) разложена на сомножители  $G_{PI}$  и  $G_{PD}$ , которые могут рассматриваться независимо, но при условии, что они удовлетворяют заданной структуре регулятора. Передаточная функция, определенная формулами (3.13) и (3.14), может быть также выражена в виде

$$G_{PID} = \frac{K_D(p+Z_{PI})(p+Z_{PD})}{p} = G_{PID} = \frac{K_D p^2 + (Z_{PI} + Z_{PD})K_D p + (Z_{PD}Z_{PI}K_D)}{p}.$$

После передаточная функция примет следующий вид:

$$G_{PID} = \frac{K_D p^2}{p} + \frac{(Z_{PI} + Z_{PD})K_D p}{p} + \frac{(Z_{PD}Z_{PI}K_D)}{p} = (Z_{PI} + Z_{PD})K_D + \frac{(Z_{PD}Z_{PI}K_D)}{p} + K_D p.$$

Введя обозначения  $K_1 = (Z_{PI} + Z_{PD})K_D$ ,  $K_2 = (Z_{PD}Z_{PI}K_D)$ ,  $K_3 = K_D$ , получим вторую форму записи передаточной функции ПИД-регулятора

$$G_{PID} = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p. \quad (3.15)$$

Полученная передаточная функция ПИД-регулятора может быть определена также через относительный коэффициент демпфирования  $\zeta$  и собственную частоту демпфированных колебаний  $\omega_n$  в следующем виде:

$$G_{PID}(p) = \frac{K_D \left( p^2 + \frac{K_p p}{K_D} + \frac{K_I}{K_D} \right)}{p} = \frac{K_D (p^2 + 2\zeta \omega_n p + \omega_n^2)}{p}, \quad (3.16)$$

где  $\omega_n^2 = \frac{K_I}{K_D}$  и  $2\zeta \omega_n = \frac{K_p}{K_D}$ .

Передаточная формула регулятора (3.13) может также быть выражена в терминах постоянной времени для дифференциальной и интегральной составляющих в следующей форме:

$$G_{PID} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right). \quad (3.17)$$

Здесь  $T_I$  постоянная времени интегральной составляющей  $T_I = \frac{K_p}{K_I}$ ,  $T_D$  постоянная времени дифференциальной составляющей  $T_D = \frac{K_D}{K_p}$ .

Поэтому имеем  $K_I = \frac{K_p}{T_I}$ ,  $K_D = K_p T_D$ .

### 3.2.2. Реакция системы на ввод ПИД-регулятора

Введение ПИД-регулятора в замкнутую систему управления ПО может привести к появлению следующих негативных последствий.

1. ПИД-регулятор вводит нули в передаточную функцию замкнутой системы, что может привести к выбросам в переходной характеристике. Чтобы отфильтровать сигнал с ПИД-регулятора и устранить выбросы, используется префильтр [107,110].

2. Контроллер, разрабатываемый по способу 1, становится некаузальным, так как числитель передаточной функции регулятора имеет более высокую степень по сравнению со знаменателем. Передаточная функция такого регулятора является физически нереализуемой. Поэтому на практике все сигналы с ПИД-регулятора содержат высокочастотный шум и с дифференцирующим звеном будут только усиливать этот шум. Чтобы избежать этого, дифференциальная составляющая  $K_D s$  обычно реализуется в сочетании с фильтром высоких частот  $(\frac{1}{\tau s} + 1)$  с небольшой постоянной времени, как правило, менее  $1/5$  от коэффициента  $T_D$  для некоторого малого  $\tau$ . В результате происходит ослабление высокочастотного шума и передаточная функция ПИД-регулятора с реальным дифференцирующим звеном приобретает вид

$$G_{PID} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + \frac{T_D p}{1 + \frac{T_D p}{N}} \right),$$

где  $\tau = \frac{T_D}{N}$  — постоянная времени инерционной составляющей компенсации высокочастотного шума, константа  $N$  определяет коэффициент усиления  $K_{HF}$  ПИД-регулятора в диапазоне высоких частот. Коэффициент усиления  $K_{HF}$  должен быть ограничен, поскольку сигнал измерения шума часто содержит высокочастотные компоненты. Как правило, делитель  $N$  выбирается в диапазоне от 2 до 20 [105].

Смысл использования закона ПИД-регулирования очевиден. Добавление в закон регулирования пропорциональной и дифференциальной составляющих позволяет предсказать значение ошибки в секундах в будущем (коэффициент  $T_D$ ) в области средних и высоких частот, если структура контура управления остается неизменной. Интегральная составляющая ПИД-регулятора стабилизирует значение ошибки, компенсируя сумму всех прошлых ошибок до их полно-

го исключения в секундах (коэффициент  $T_I$ ) в области низких частот. В результате компенсируется значение ошибки, масштабируемое с помощью единственного коэффициента усиления  $K_p$ .

Большинство сложных систем, в силу разнородности протекающих в них процессов, допускают *декомпозицию* на более простые системы, динамические свойства которых определяются расположением корней характеристического уравнения на комплексной плоскости и поставленной задачей управления. Они имеют доминирующие особенности, которые обычно допускают аппроксимацию исходной системы системами первого или второго порядков. Например, линеаризованные уравнения динамики продольного движения воздушного судна определяются двумя системами второго порядка, одна из которых описывает короткопериодическое быстро затухающее движение по углу тангажа, другая характеризует длиннопериодическое медленно затухающее движение по вектору воздушной скорости [106].

Система управления в большей степени реагирует на полюса корневого годографа, которые расположены ближе всего к мнимой оси, то есть полюса с наименьшим значением действительной части комплексного числа. Такие полюса называются доминирующими полюсами. При этом многократно можно определять один полюс или пару полюсов как доминирующие. Так, в задаче управления углом тангажа на малом интервале времени (порядка 3...4 с) доминирующими оказываются корни короткопериодического быстро затухающего движения самолета, а при управлении воздушной скоростью на большом интервале времени (порядка 40...60 с) доминируют корни длиннопериодического медленно затухающего движения (короткопериодическое движение воздушного судна затухает). Становится очевидным, что параметры ПИД-регулятора по ка-

налам управления практически любой сложной системы могут быть получены из соотношений относительного коэффициента (декремента) затухания и собственной частоты доминирующих полюсов ее свободного движения.

Известно, что условия представления исходной системы системами первого и второго порядков следующие [106]:

1. Для системы первого порядка полюс является доминирующим если он расположен ближе всего к мнимой оси.
2. Для системы выше второго порядка, доминирующей является пара полюсов второго порядка, если все из оставшихся полюсов более чем на пять временных констант ( $5T$ ) расположены левее доминирующего полюса.

Система второго порядка, которая задается формулой

$$G(p) = K \frac{\alpha\beta}{(p+\alpha)(p+\beta)},$$

также может быть аппроксимирована как система первого порядка. Здесь условие доминирующего полюса первого порядка определяется по правилу: доминирующим является полюс, который расположен ближе всего к мнимой оси. При этом доминирующим считается полюс, для которого справедлив закон  $\beta/\alpha > 5$ . В нашем случае корень  $\alpha$  находится ближе к мнимой оси и система второго порядка может быть аппроксимирована системой первого порядка с передаточной функцией

$$G(s) = K \frac{\alpha}{(s+\alpha)}.$$

Система третьего порядка с одним действительным корнем и парой комплексно-сопряженных корней выражается формулой

$$G(s) = K \frac{\alpha}{(s+\alpha)(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)}.$$

Аппроксимирующие системы первого и второго порядков по условию доминирующего полюса имеют вид

$$\frac{K/\omega_{\Pi}^2}{(s+\alpha)}, \text{ если } 10\alpha < \zeta\omega_{\Pi},$$

и

$$\frac{K/\alpha}{(s^2+2\zeta\omega_{\Pi}s+\omega_{\Pi}^2)}, \text{ если } \alpha > 2.5\zeta\omega_{\Pi}.$$

Таким образом, при восстановлении линейного объекта в общем случае игнорируются динамические свойства тех звеньев первого или второго порядков, действительные корни или действительные части комплексно-сопряженных корней которых по модулю много больше действительного корня или действительной части комплексно-сопряженных корней доминирующего полюса. Если САР подверглась декомпозиции и представлена в упрощенном виде, такая система называется *редуцированной*.

Следует отметить, что в многосвязной системе необходимо учитывать специфику решаемой задачи управления, связанную с разнотемповостью протекающих в ней процессов.

### 3.2.3. Определение параметров ПИД-регулятора для промышленных объектов первого порядка с запаздыванием

ПО и системы, которые могут быть аппроксимированы передаточной функцией первого порядка, главным образом зависят от постоянной времени  $T$

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

Значение коэффициентов ПИД-регулятора для систем первого порядка можно определить [107] по формулам:



$$T_I = \frac{K_p}{K_I} = \frac{T}{T} = 1, T_D = \frac{K_D}{K_P} = \frac{T}{T} = 1.$$

Согласно исследованиям [88-90], дифференциальные и интегральные составляющие взаимозависимы через поправочные коэффициенты  $\alpha = [0.1, 3]$  и  $\varepsilon = [0.1, 2]$  соответственно, как показано в табл. 3.3,  $N$  – поправочный коэффициент фильтра низких частот.

Большое число промышленных объектов, в том числе гидроагрегат ГЭС [100], может быть представлено с допустимой точностью передаточным звеном первого порядка с запаздыванием FOPD-моделями [111]. FOPD-модель – это модель системы, состоящей из систем первого порядка и звена запаздывания.

Для нахождения значений коэффициентов ПИД-регуляторов модальным способом необходимо воспользоваться формулами, приведенными в табл. 3.1.

Параметры ПИД-регулятора для звена первого порядка Таблица 3.1

Коэффициент регулирования	$K_p$	$K_I$	$K_D$	$T_D$	$T_I$	$N$
Формулы	$T$	$\alpha T$	$\varepsilon T$	1	1	2...20
Пределы ограничений	$T$	$\alpha T$ $\alpha = 0.1...3$	$\varepsilon T$ $\varepsilon = 0.1...2$	$\varepsilon$ $\varepsilon = 0.1...2$	$\frac{1}{\alpha}$ $\alpha = 0.1...3$	

Для проверки работоспособности и достоверности предполагаемого способа настройки ПИД-регулятора была смоделирована Simulink-модель (рис 3.7), в которой предусмотрены два вида ПИД-регулятора, с префильтром (нижний) и без него (верхний), с передаточной функцией, полученной в предыдущей главе.

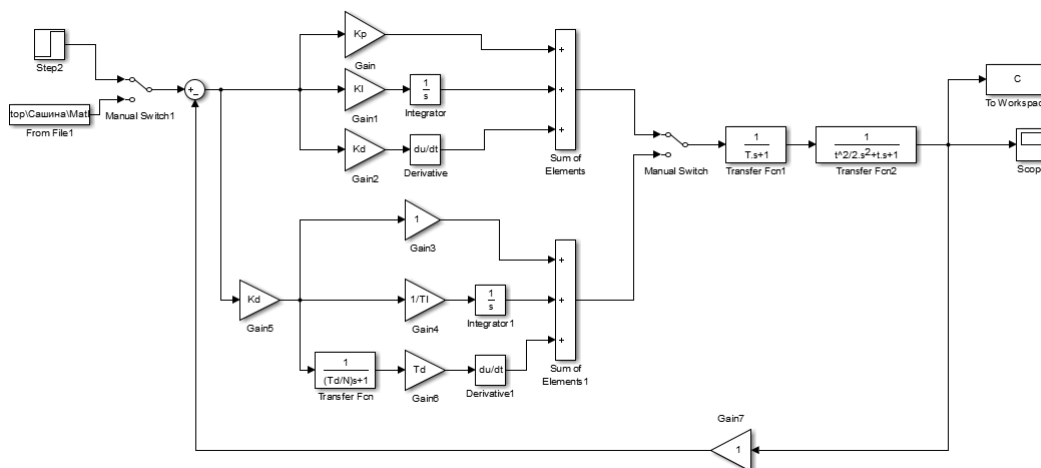


Рис 3.7. Схема Simulink-модели ПИД-регулятора

В данной модели были использованы следующие блоки:

- Step – моделирование единичного ступенчатого воздействия,
- FromFile – моделирование произвольного воздействия,
- Gain – блок для учета коэффициентов ПИД-регулятора,
- Sum of elements – сумматор,
- ManualSwitch – ключи, позволяющие выбирать нужный вариант схемы,
- TransferFcn – передаточная функция объекта,
- ToWorkspace – блок, выводящий реакцию системы в рабочую среду для дальнейших расчетов,
- Score – блок для вывода графика реакции системы.

В данной схеме управления смоделировано два вида ПИД-регулятора: с префильтром и без префильтра. Выбор необходимого регулятора производится посредством смены положения ключа ManualSwitch. Такой способ позволяет быстро оценить работу двух ПИД-регуляторов с выбранными по таблице 3.1 параметрами и сменить регулятор без необходимости перемоделирования схемы.

Значения коэффициентов ПИД-регулятора, вычисленные по формулам, предложенным выше, представлены в табл 3.2.

Значения коэффициентов ПИД-регулятора Таблица 3.2

№	Коэффициенты ПИД-регулятора						
	$T$	$K_p$	$K_I$	$K_D$	$T_D$	$T_I$	$N$
1	40,9	40,9	4,09	36,81	-	-	-
2	40,9	40,9	20,45	30,7	-	-	-
3	40,9	-	-	-	1,667	1,6	20
4	40,9	-	-	-	2	3,33	20

Ниже представлены графики реакции (рис. 3.8 и рис. 3.9) системы с подключенным ПИД-регулятором с использованием коэффициентов из табл. 3.2 и схемы на рис. 3.7.

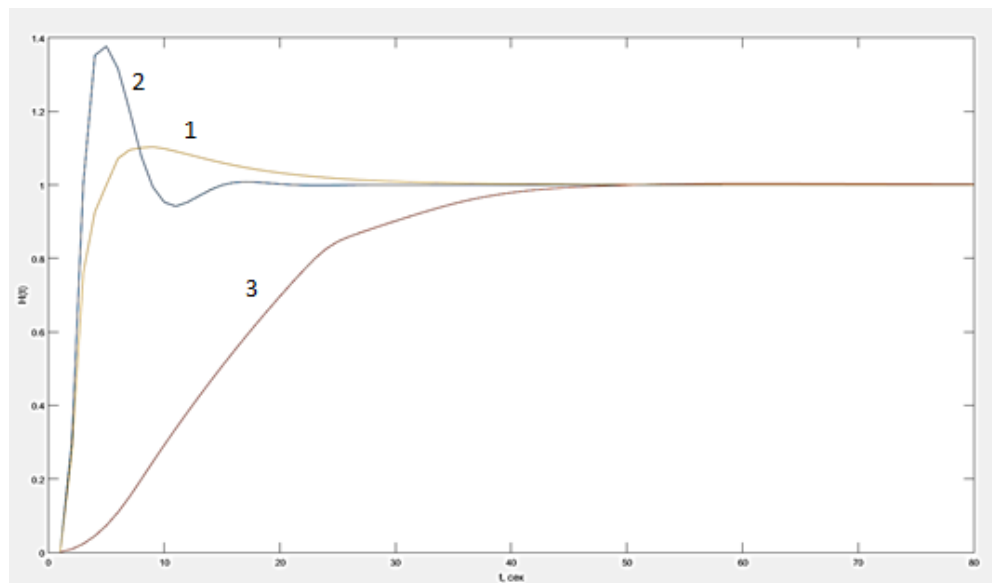


Рис 3.8. Графики реакции систем с различными параметрами ПИД-регулятора

На данном графике кривая разгона 1 – первая строка параметров из табл. 3.2., кривая разгона 2 – вторая строка, кривая разгона 3 – экспериментальная

кривая. Как можно заметить в обоих случаях присутствует момент перерегулирования, в первом в пределах 10%, во втором – 38%.

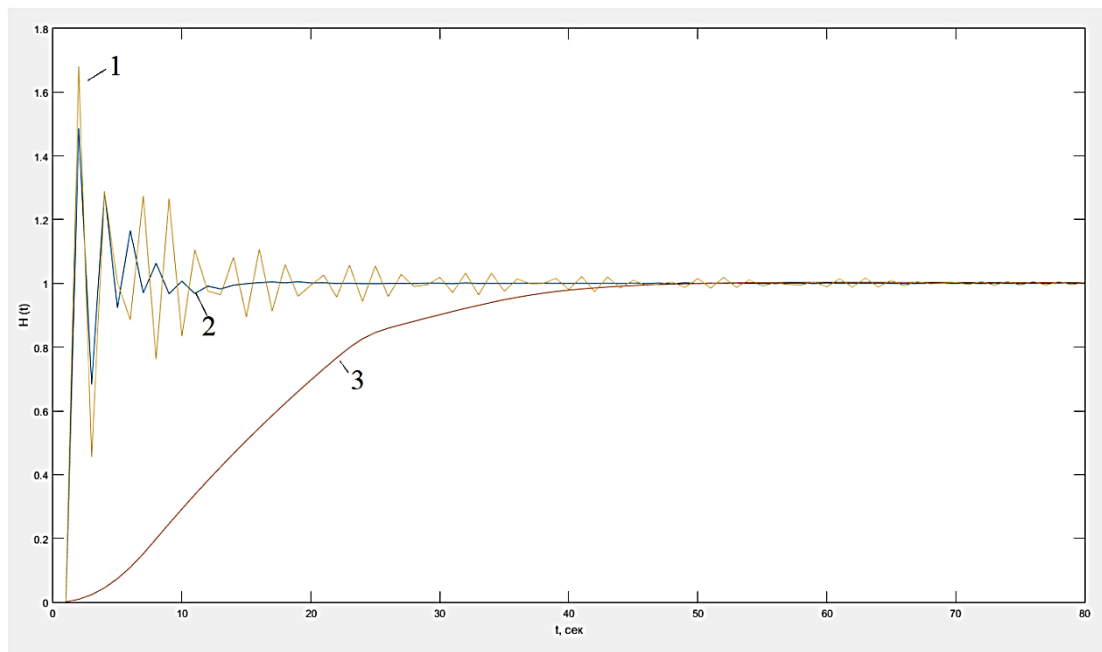


Рис 3.9. Графики реакции систем с различными параметрами ПИД регулятора

На этом графике, где кривая разгона 1 – третья строка параметров из табл. 3.2, кривая разгона 2 – четвертая строка, кривая разгона 3 – экспериментальная кривая, отчетливо видно наличие большого количества колебаний. Увеличение значения перерегулирования до 40% и 60% соответственно.

Для объектов, не допускающих перерегулирования или колебательных процессов в режиме нормального функционирования (например, в случае с гидрогенератором), данные графики не могут быть удовлетворительными.

Как можно заметить, ограничения, приведенные в табл. 3.1, не позволяют избавиться от перерегулирования, хотя и значительно уменьшают время регулирования.

Для получения более качественных характеристик управления было решено увеличить диапазон, указанный в табл. 3.1. В нашем случае необходимо изменить  $\alpha$ , новый диапазон будет выглядеть следующим образом:  $\alpha=0,01-3$ .

При  $K_I=0.409$ ,  $K_d=81.8$  и  $K_p=40.9$  получим характеристики, представленные на рис. 3.10.

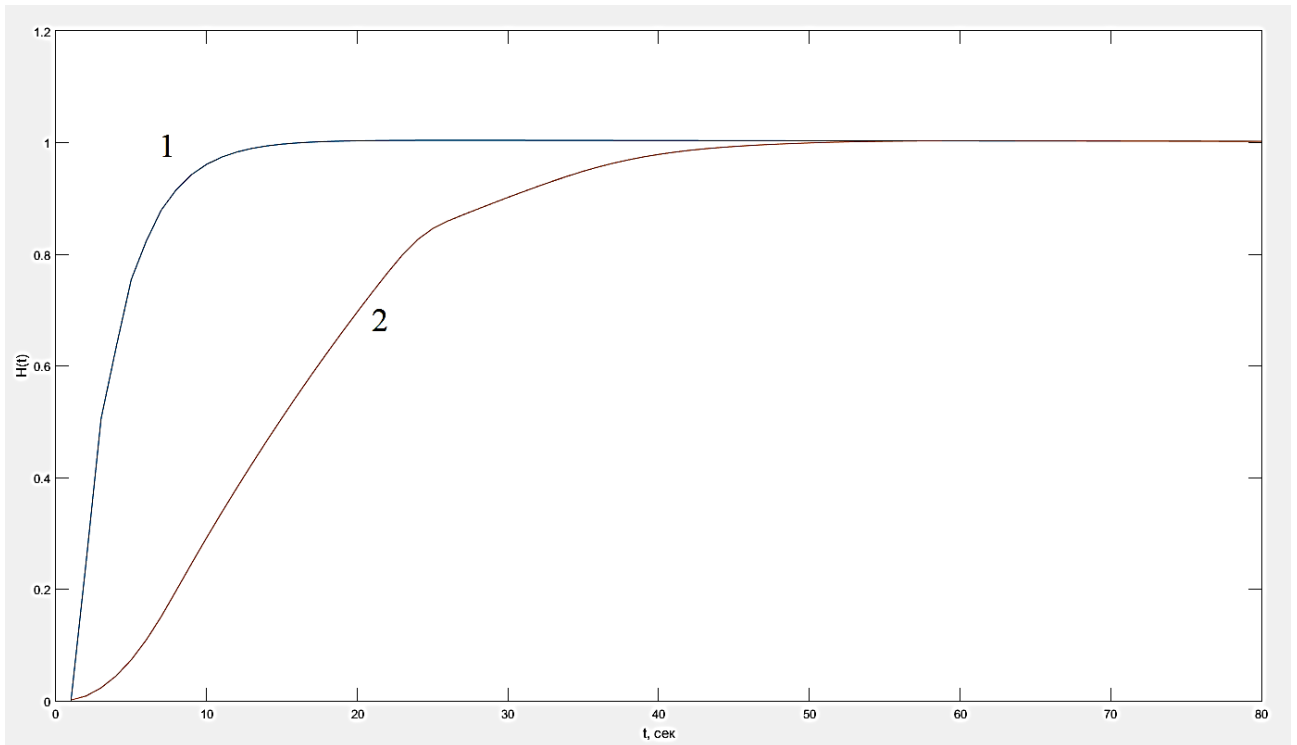


Рис. 3.10. График реакции системы с новыми ограничениями параметров ПИД-регулятора.

На графике, где кривая разгона 1 – система с ПИД-регулятором, кривая разгона 2 – экспериментальная кривая, видно, что перерегулирование составляет 0,4%, время регулирования – 10 с, и отсутствуют колебания системы.

Введение ПИД-регулятора в систему автоматического регулирования скорости вращения гидрогенератора позволяет существенно улучшить качество регулирования. А реализация данного метода дает быстрый и надежный способ получения значений для коэффициентов регулирования в понятном и удобном виде для обслуживающего персонала.

## Выводы

Все объекты управления в том или ином виде имеют составляющие запаздывания, это необходимо учитывать при синтезе систем управления ПО. В данной главе были рассмотрены метод определения коэффициента запаздывания и метод определения коэффициентов для ПИД-регулятора в системе автоматического регулирования скорости вращения гидрогенератора, для повышения устойчивости и качества регулирования ПО с запаздыванием. В результате можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициенты передачи и постоянные времени передаточной функции являются диагностическими параметрами, позволяющими получить информацию о состоянии САР в режиме нормального функционирования.

2. В случае возникновения колебательного характера переходного процесса (рис. 3.2) появляется возможность использовать резонансные методы диагностирования.

3. Предложенный метод определения параметров ПИД-регуляторов, позволяет за счет компромиссного выбора настроечных коэффициентов сглаживания и демпфирования существенно уменьшить время регулирования и полностью устранить перерегулирование, а также через подходящий выбор постоянной времени высокочастотного фильтра скомпенсировать внешние возмущения, и как следствие, повысить запас устойчивости САР. Данный подход дает возможность реализовать активные методы диагностирования ПО [52].

## ГЛАВА 4 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

В настоящее время, можно утверждать, существует разрыв теории и практики в диагностировании ПО [112-124]. По объективным причинам это встречается довольно часто в прикладных науках.

Электромеханические и гидромеханические ПО являются основными объектами, используемыми в современной промышленности. Мониторинг их состояния и диагностирование с целью предотвращения их постепенных отказов оказывает непосредственное влияние на экономическую безопасность предприятия и промышленности в целом. Актуальность данной проблемы очевидна так как большинство современных производств использует ПО с исчерпавшим запасом прочности.

Для повышения качества получаемого диагноза необходимо разработать такой метод диагностирования, который мог бы быть применим для широкого круга объектов и позволяли бы определять состояние объекта диагностирования во время его нормального функционирования.

### **4.1. Резонансный метод диагностирования**

Предлагаемый в диссертационном исследовании *резонансный метод диагностирования* колебательных промышленных объектов (КПО) апробирован на реальных электромеханических и гидромеханических объектах.

Использование резонансного метода диагностирования КПО позволяет существенно сократить время выявления постепенных отказов и увеличить

точность диагноза технического состояния ПО, если он допустим по условиям эксплуатации КПО [125].

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

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (4.1)$$

где  $T_2^2 = LC$ ,  $T_1 = RC$ , при условии  $T_1 < 2T_2$ , и амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)

$$W(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}}. \quad (4.2)$$

Резонансная частота для передаточной функции может быть определена по формуле

$$\frac{W(\omega)}{d\omega} = 0.$$

**Алгоритм диагностирования** [76, 125, 126] выглядит следующим образом:

1. Определить резонансную частоту контура  $f$  расчетным или экспериментальным способом.
2. Определить постоянную времени  $T_2$  по формуле  $T_2 = \frac{1}{2\pi f}$  при условии  $T_2 \gg T_1$ .
3. Определить постоянную времени  $T_1$  по формуле  $T_1 = \frac{1}{2\pi f W(f)}$ .
4. Подключить конденсатор с известной ёмкостью  $C_0$  (метод пробных подключений) параллельно конденсатору  $C$ .
5. Определить новую резонансную частоту контура  $f_0$ .



6. Определить постоянную времени  $T_{20}$  по формуле  $T_{20} = \frac{1}{2\pi f_0}$ .

7. Определить значения структурных параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$  по формулам

$$R = \frac{T_1}{C}, \quad L = \frac{T_{20}^2 - T_2^2}{C_0}, \quad C = \frac{T_2^2}{T_{20}^2 - T_2^2} C_0.$$

Информация о работоспособности диагностируемого ПО формируется на основании анализа полученных значений структурных параметров RLC-контура. Например, если расхождение по сравнению с паспортными, номинальными значениями превысит некоторую установленную величину, то можно сделать вывод, что данный ПО необходимо выводить из эксплуатации и проводить ремонт или замену комплектующих.

*Метод пробных подключений* заключается в том, что к исследуемой системе подключаются дополнительные элементы с известными параметрами и оценивается их влияние на диагностируемую систему.

Использование резонансного метода диагностирования КПО, если он допустим по условиям нормальной эксплуатации, позволяет достичь более точных результатов по сравнению с другими методами диагностирования. Обоснованность этого положения подтверждается разработанными алгоритмами резонансного диагностирования передней подвески автомобиля и контактной системы зажигания [76, 127].

Передаточная функция контактной системы зажигания может быть записана в виде [127, 128]

$$W(p) = \frac{b_5 p + k_1}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (4.3)$$

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 высокочастотной областях. На рис. 4.1 представлена АЧХ контактной системы зажигания автомобиля [128].

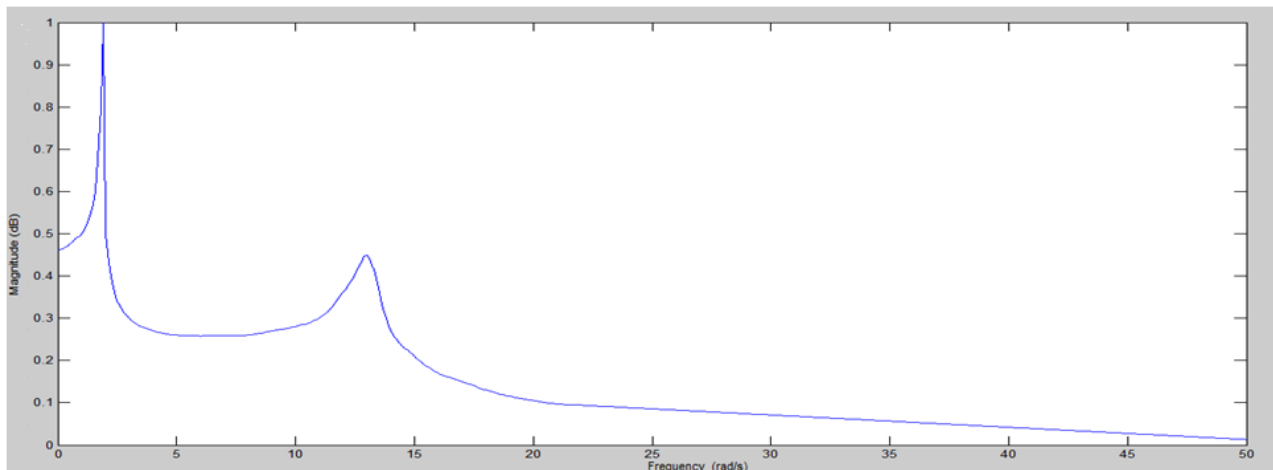


Рис. 4.1. Амплитудно-частотная характеристика контактной системы зажигания автомобиля

Резонансные частоты низкочастотной и высокочастотной составляющих выходного сигнала системы зажигания могут быть найдены по формулам [129]

$$\omega_1 = \sqrt{1/(L_1 C_1 + L_2 C_2)}, \quad (4.4)$$

$$\omega_2 = \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2)/(L_1 C_1 L_2 C_2 (1 - k_M^2))}, \quad (4.5)$$

где  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки катушки зажигания,  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки катушки зажигания,  $C_1$  – емкость конденсатора,  $C_2$  – емкость, учитывающая распределённую емкость высоковольтной цепи,  $k_M$  – коэффициент взаимной индуктивности.

При помощи пробных подключений конденсатора с известной емкостью  $C_{10}$  параллельно конденсатору  $C_1$  и конденсатора с емкостью  $C_{20}$  параллельно выходу высоковольтной цепи, при условии измерения новых значений резонансных частот, можно составить систему нелинейных алгебраических уравнений, нелинейных относительно  $L_i$  и  $C_i$ :

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{1/(L_1(C_1 + C_{10}) + L_2C_2)} &= \omega_3; \\ \sqrt{1/(L_1C_1 + L_2(C_2 + C_{20}))} &= \omega_4; \\ \sqrt{(L_1(C_1 + C_{10}) + L_2C_2)/(L_1(C_1 + C_{10})L_2C_2(1 - k_M^2))} &= \omega_5; \\ \sqrt{(L_1C_1 + L_2(C_2 + C_{20}))/(L_1C_1L_2(C_2 + C_{20})(1 - k_M^2))} &= \omega_6. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Решения данной системы получены с помощью символьных вычислений, приведённых в табл. 4.1. Результат решения данных выражений будет представлен в виде аналитической зависимости от этих параметров.

Строго говоря, такая постановка задачи по формированию алгоритма диагностирования системы зажигания имеет неоднозначность решения, так как получены четыре решения вместо одного. Однако второе и третье решение не имеют физического смысла, а четвертое решение соответствует внезапному отказу системы зажигания, когда значение структурных параметров изменилось практически вдвое относительно их номинальных значений, что не соответствует действительности.

Решения системы уравнений (4.6) Таблица 4.1

№	$L_1$ , мГн	$L_2$ , Гн	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , нФ
1	6.299	19.098	2.700e-1	6.101e-2
2	-4.314	-27.884	-5.400e-1	-1.220e-1
3	-1.984	-17.572	-5.570e-1	-1.936e-1
4	3.969	8.785	5.896e-1	1.326e-1

Проведя эвристический анализ полученных решений, т.е. отбросив группы значений, в которых присутствуют отрицательные параметры и параметры, отличающиеся от номинальных более чем на 50%, можно сделать вывод, что реальным значениям структурных параметров системы зажигания соответствуют значения постепенных отказов системы зажигания:

$$L_1=6.299 \text{ мГн}, L_2=19,098 \text{ Гн}, C_1=2,700e-1 \text{ мкФ}, C_2=6,101e-2 \text{ нФ},$$

Анализ полученных значений позволяет формировать диагноз (прогноз) системы зажигания.

Значение резонансных частот можно определить непосредственно по переходным процессам, полученным в ходе нормального функционирования некоторых колебательных объектов или систем, например системы зажигания. Напряжение  $U$  на конденсаторе контактной системы зажигания имеет вид, представленный на рис. 4.2.

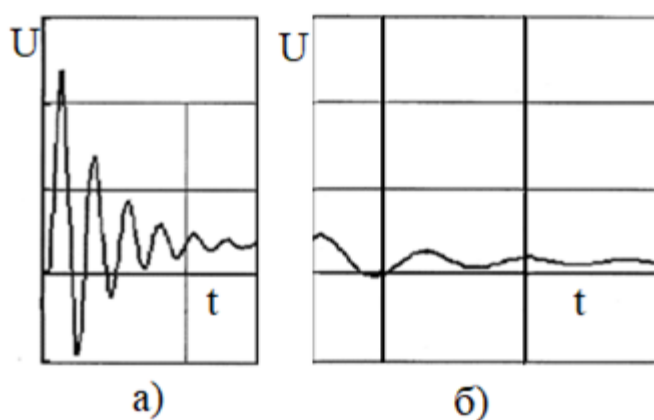


Рис. 4.2. Кривая изменения напряжения на контактах прерывателя: а) процесс искрообразования, б) свободные колебания

Резонансная частота колебаний напряжения в процессе искрообразования определяется по формуле

$$\omega_7 = \sqrt{1/L_1 C_1}. \quad (4.7)$$

При подключении конденсатора с известной емкостью  $C_{10}$  методом пробным подключений частота определяется по формуле

$$\omega_{70} = \sqrt{1/(L_1(C_1 + C_{10}))}. \quad (4.8)$$

Из системы нелинейных уравнений (4.7) и (4.8), находим значения  $L_1$ ,  $C_1$  при измеренных значениях  $\omega_7$  и  $\omega_{70}$ .

Частота свободных колебаний контура  $L_1, C_1, L_2, C_2$  определяется по формуле [125]

$$\omega_8 = \sqrt{\frac{L_1 C_1 + L_2 C_2}{L_1 C_1 L_2 C_2 (1 - k_M^2)}}. \quad (4.9)$$

При пробном подключении конденсатора с известной емкостью  $C_{20}$  эта частота определяется по формуле

$$\omega_{80} = \sqrt{\frac{L_1 C_1 + L_2 (C_2 + C_{20})}{L_1 C_1 L_2 (C_2 + C_{20}) (1 - k_M^2)}}. \quad (4.10)$$

Из системы двух нелинейных уравнений 4.9 и 4.10 получим значения  $L_2$  и  $C_2$  при вычисленных значениях  $L_1$  и  $C_1$  и измеренных значениях  $\omega_8$  и  $\omega_{80}$ .

Анализируя полученные значения  $L_1, C_1, L_2, C_2$ , можно сделать вывод о техническом состоянии системы зажигания.

Таким образом, предложенный резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов позволяет определять значения структурных параметров объектов диагностирования по резонансным частотам. Если число диагностируемых параметров больше, чем число резонансов, то предлагается использовать метод пробных подключений для увеличения числа резонансных частот.

#### 4.2. Диагностирование подвески автомобиля

Передняя подвеска автомобиля, как КПО [128,129], состоит из двух колебательных звеньев, соединенных последовательно: неподрессоренной и поддрессоренной частей. Передаточная функция этих колебательных звеньев быть представлена в виде

$$W(p) = \frac{k}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (4.11)$$

где  $k, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты передаточной функции.

Естественно, что такая колебательная система имеет резонансы в низко-частотной и высокочастотной областях, в которых неподрессоренная и поддрессоренная части выделяются как самостоятельные объекты диагностики.

Резонансные частоты неподрессоренного и поддрессоренного звеньев определяются по формулам [125]:

$$\omega_{ш} = \frac{\sqrt{4C_{ш}m - C_1^2}}{2m}, \quad \omega_p = \frac{\sqrt{4C_pM - C_2^2}}{2M}, \quad (4.12)$$

где  $\omega_{ш}$  – резонансная частота неподрессоренного звена подвески,  $\omega_p$  – резонансная частота поддрессоренного звена подвески,  $C_1$  – коэффициент вязкого трения неподрессоренного звена подвески,  $C_2$  – коэффициент вязкого трения поддрессоренного звена подвески,  $C_{ш}$  – суммарная жесткость шин,  $C_p$  – суммарная жёсткость рессор,  $m$  – приведенная неподрессоренная масса,  $M$  – приведенная поддрессоренная масса.

На рис. 4.3 представлена АЧХ передней подвески автомобиля ГАЗ-24, по которой можно определить резонансные частоты шин и рессор передней подвески автомобиля  $\omega_{ш}=67.5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_p=7,32 \text{ с}^{-1}$ .

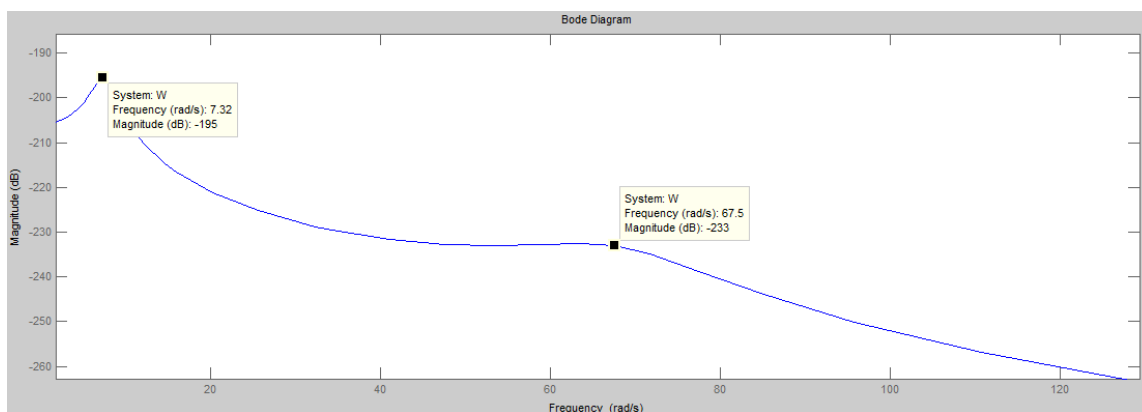


Рис. 4.3. Амплитудно-частотная характеристика подвески автомобиля

Используя метод пробных подключений и известные значения  $m$  и  $M$ , можно получить систему четырех нелинейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} \omega_{ш} &= \frac{\sqrt{4C_{ш}m - C_1^2}}{2m}; \\ \omega_p &= \frac{\sqrt{4C_pM - C_2^2}}{2M}; \\ \omega_{ш1} &= \frac{\sqrt{4(C_{ш} + C_{ш1})m - C_1^2}}{2m}; \\ \omega_{p1} &= \frac{\sqrt{4(C_p + C_{p1})M - C_2^2}}{2M}, \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

где  $C_{p1}$  и  $C_{ш1}$  – пробные подключения для суммарной жесткости рессоры и шины соответственно,  $\omega_{ш1}$  и  $\omega_{p1}$  – значения резонансных частот после пробного подключения. Неизвестные параметры системы :  $C_{ш}$ ,  $C_1$ ,  $C_p$ ,  $C_2$ .

На основании эвристического анализа полученных решений данной системы [130] можно определить значения структурных параметров подвески  $C_1$ ,  $C_{ш}$ ,  $C_2$ ,  $C_p$  которые характеризуют её состояние.

В результате проведенных теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований можно констатировать: для проведения диагностирования колебательных систем резонансным методом достаточно экспериментально определить лишь величины резонансных частот. Используя методом пробных подключений можно получить необходимое количество уравнений и найти нужные параметры диагностирования

### **4.3. Диагностирования линейной стационарной системы автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока**

Анализируя результаты (табл. 2.6), полученные в ходе идентификации динамики линейной САР скорости двигатель постоянного тока (ДПТ), можно отметить изменения в параметрах ДПТ.

При диагностике САР скорости ДПТ определяются параметры двигателя и усилителя, которые влияют на изменения переходной функции. В нашем случае можно сделать вывод о наличии постепенных отказов в двигателе, так как существенно уменьшились электромеханические постоянные времени  $T_{Д1}$  и  $T_{Д2}$ .

Для проведения диагностирования резонансным методом необходимо определить резонансные частоты системы. Для этого найдем АЧХ линейной САР скорости ДПТ (рис. 4.4).

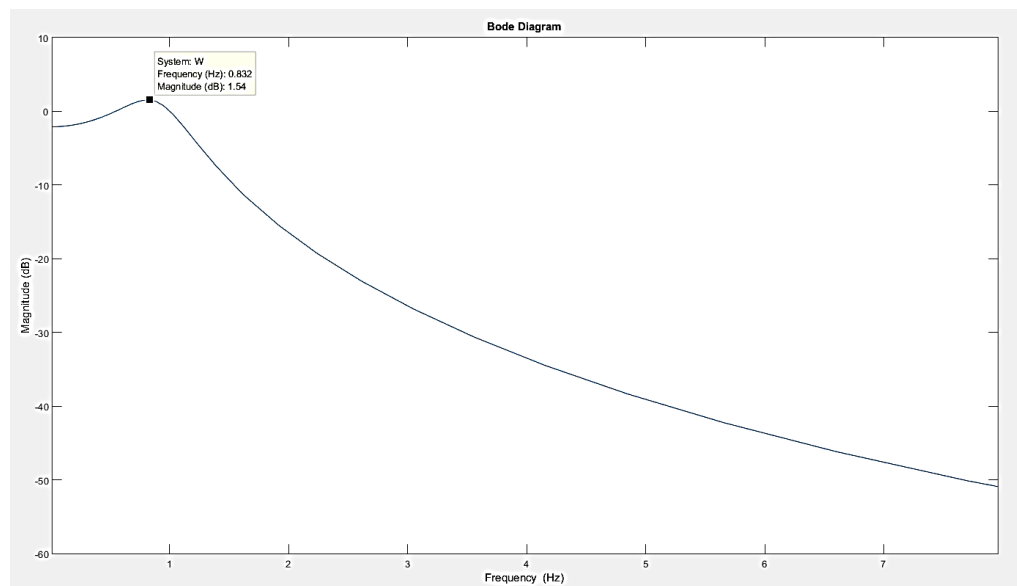


Рис. 4.4. АЧХ линейной стационарной САР скорости ДПТ

Из опыта эксплуатации известно, что магнитный усилитель (глава 2.5) незначительно влияет на резонансную частоту системы. Тогда передаточная функция системы САР скорости ДПТ (2.22) примет вид

$$W(p) = \frac{3,65}{0.072p^2 + 0.72p + 4.65}.$$

АЧХ системы приведена на рис. 4.5.



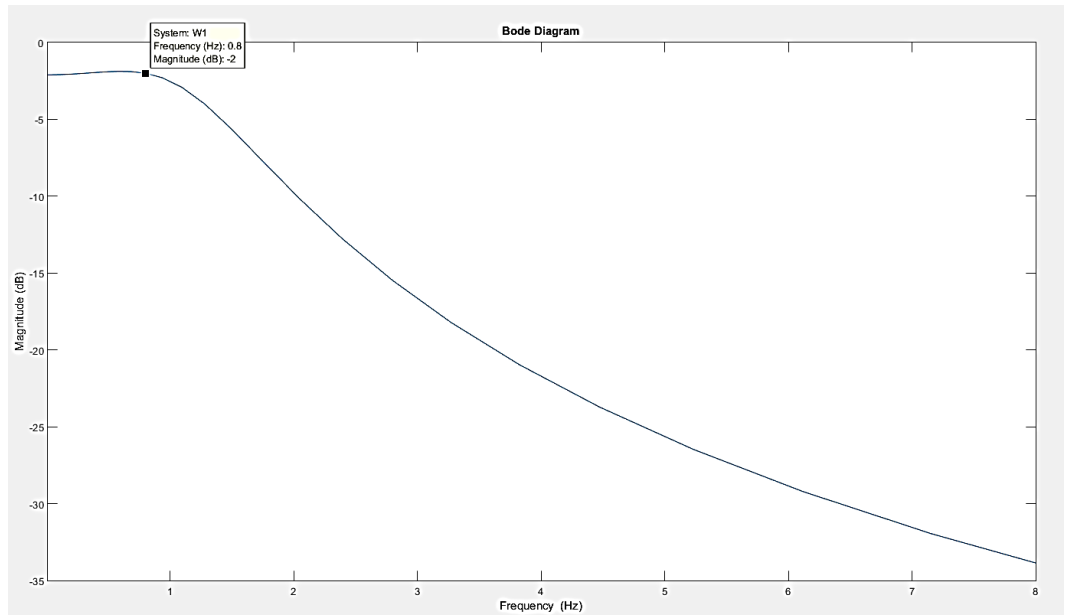


Рис. 4.5. АЧХ линейной стационарной САР скорости ДПТ без усилителя.

Зависимость резонансной частоты от постоянных времени двигателя определена по формуле [126]:

$$\omega = \frac{\sqrt{(-1)(T_{д1}^2 + T_{д2}^2 - 2T_{д1}T_{д2} - 4T_{д1}T_{д2}K_{р.с.})}}{2T_{д1}T_{д2}}, \quad (4.14)$$

где  $T_{д1}$  и  $T_{д2}$  вычисляются по следующим формулам:

$$T_{д1} = \frac{JR_{я}}{C_e C_M}, \quad T_{д2} = \frac{L_{я}}{R_{я}}, \quad (4.15)$$

где  $J$  – момент инерции,  $R_{я}$  – сопротивление якоря,  $C_e$  – постоянная двигателя по скорости,  $C_M$  – постоянная двигателя по моменту,  $L_{я}$  – индуктивность якоря.

Подставляя значения  $T_{д1}$  и  $T_{д2}$  из формулы 4.15 в 4.14, получим

$$\omega = \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 R_{я}^4 + L_{я}^2 C_B^2 C_M^2 - 16,6 J R_{я}^2 L_{я} C_B C_M}{R_{я}^2 C_B^2 C_M^2} \right) \frac{C_B C_M}{2 J L_{я}}}. \quad (4.16)$$

В нашем случае номинальные, паспортные значения составляют  $J = 520$  г·см<sup>2</sup>,  $R_{я} = 0,218$  Ом,  $C_e = 2,57 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ,  $C_M = 0,244 \frac{\text{кГм}}{\text{А}}$ ,  $L_{я} = 0,15$  Гн. Далее необходимо определить, как изменились значения этих параметров при эксплуатации двигателя.

После нахождения резонансной частоты системы  $\omega$  и при условии, что постоянные двигателя по моменту  $C_e$  и скорости  $C_m$  не изменились, формула (4.16) примет вид

$$\omega = \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 R_{я}^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J R_{я}^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot R_{я}^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}. \quad (4.17)$$

Так как уравнение (4.17) имеет три неизвестных, необходимо ввести, методом пробным подключений, известные сопротивления  $R_{я1}=0,1$  Ом и  $R_{я2}=0,2$  Ом. Составим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \omega_d &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 R_{я}^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J R_{я}^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot R_{я}^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \\ \omega_{d1} &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 (R_{я} + R_{я1})^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J (R_{я} + R_{я1})^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot (R_{я} + R_{я1})^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \\ \omega_{d2} &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 (R_{я} + R_{я2})^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J (R_{я} + R_{я2})^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot (R_{я} + R_{я2})^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

где  $\omega_d$  – резонансная частота САР скорости ДПТ,  $\omega_{d1}$  – резонансная частота САР скорости ДПТ после подключения  $R_{я1}$ ,  $\omega_{d2}$  – резонансная частота САР скорости ДПТ после подключения  $R_{я2}$ .

Для точного определения значений необходимо решить систему уравнений, количество которых должно быть не меньше количества искомых параметров.

Измерив, новые резонансные частоты, подставив новые значения частот в систему (4.18), получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 6,29 &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 R_{я}^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J R_{я}^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot R_{я}^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \\ 6,95 &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 (R_{я} + 0.1)^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J (R_{я} + 0.1)^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot (R_{я} + 0.1)^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \\ 7,11 &= \sqrt{(-1) \left( \frac{J^2 (R_{я} + 0.2)^4 + 393 \cdot 10^3 \cdot L_{я}^2 - 104 \cdot 10^2 \cdot J (R_{я} + 0.2)^2 L_{я}}{393 \cdot 10^3 \cdot (R_{я} + 0.2)^2} \right)} \frac{627}{2 J L_{я}}, \end{aligned} \right\}$$

Решая данную систему нелинейных уравнений, можно получить диагностическую информацию о САР скорости ДПТ. Значения структурных параметров двигателя составили  $J = 376,25 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ ,  $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $L_{\text{я}} = 0,12 \text{ Гн}$ . Изменение полученных параметров по сравнению с номинальными составило у момента инерции – 27,6%, у сопротивления якоря – 8,25%, у индуктивности якоря – 20%.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о сильном изменении структурных параметров системы, а следовательно, о необходимости срочного ремонта системы.

После диагностирования колебательных промышленных объектов могут быть получены относительные отклонения величин от их номинальных значений. Если в ходе эксплуатации системы или объекта были установлены предельно допустимые отклонения, то при выходе за эти значения эксплуатация данного объекта или системы должна быть прекращена до выполнения ремонтных работ или полной замены объекта.

## Выводы

Методика диагностирования КПО предложенная в пункте 4.1, апробирована на нескольких КПО, а именно : система зажигания, подвеска автомобиля, система автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока. Предложенный метод диагностирования имеет следующие отличительные особенности:

1. Для проведения диагностирования колебательных систем достаточно экспериментально определить лишь величины резонансных (собственных) частот.

2. Диагностирование на основании резонансного метода позволяет существенно уменьшить время формирования диагноза состояния колебательных систем.

3. Диагностирование колебательных систем резонансным методом позволяет получить более точную и полную информацию о постепенных отказах, которую можно использовать для прогнозирования внезапных отказов объектов диагностики.

4. Резонансный метод диагностирования, если он допустим по техническим условиям, дают возможность оптимизировать стратегию поиска неисправностей.

Результаты, полученные в данном разделе, подтверждают работоспособность предложенного метода диагностирования КПО.

## **ГЛАВА 5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Автоматическая система диагностирования предназначена для проведения своевременной диагностики реальных ПО в режиме их нормального функционирования. Данная система включает в себя методы: вторичной идентификации, резонансного диагностирования и пробного подключения. Синтез методов, разработанных в ходе диссертационного исследования, позволяет получить своевременный и достоверный прогноз технического состояния диагностируемых ПО. Предложенная система диагностирования с незначительной модернизацией может быть использована на любых ПО, позволяющих реализовать предложенные методы диагностирования.

### **5.1. Структура автоматической системы диагностирования**

Разработанная система написана на языке VisualBasic (VisualStudio 2013) с использованием NET.Framework 3.5 в качестве основы визуализации и определения набора базовых библиотек инструментов. Общая структура программы представлена на рис. 5.1.

Для большого количества расчётов в программе используется MatLab, поэтому требуется, чтобы он был установлен на компьютере. Пакет MatLab так же можно заменить на MatLab Engine. VisualStudio поддерживает два способа работы с MatLab:



Рис. 5.1. Структура программы

- 1) Создание COM сервера автоматизации MatLab,
- 2) Создание подгружаемых библиотек dll [131].

В программе выбрана реализация с помощью COM сервера за простоту реализации и возможности модернизации.

Основные функции, используемые в автоматической системе диагностирования:

`CreateObject("MatLab.Application")` – создание объекта MatLab. Открывается командное окно MatLab для передачи функций.

`MatLab.Execute(«»)` – передача содержимого в MatLab. Команда, записанная в «», будет передана в командную строку MatLab.

Например, символьное вычисление параметра определяется следующим образом: `Result = MatLab.Execute("S=solve('sqrt((-1)*(C1^2-4*" + CStr(Cr * m2) + "))/2*" + CStr(m2) + ")= " + CStr(w1) + "',C1")`.

`MatLab.GetWorkspaceData("K1", "base", import)` – получение данных с MatLab в переменную «import»

Получение данных осложняется тем, что данные в MatLab хранятся в виде матрицы. Поэтому для работы требуется перевести их в поддерживаемый VisualBasic массив, попутно проверив данные на соответствие условиям.

Пример такой операции приведён ниже.

```
For index = 0 To UBound(import)
```

```
If import(index, 0) > 0 Then
```

```
q1(i) = import(index, 0)
```

```
i = i + 1
```

```
EndIf
```

```
Next
```

Ввод и вывод данных осуществляется стандартными средствами Visualstudio. Для этого применяются текстовые поля TextBox и RichTextBox. При дальнейшем развитии программы ввод данных возможно организовать из Excel, txt или использовать результаты, полученные при моделировании в MatLab.

Данные, полученные по результатам расчетов, можно записать в файл Excel. Для этого используется библиотека Microsoft.Office.Interop.

Пример передачи приведён ниже.

```
iFillFileName = "C:\\" + TextBox21.Text + ".xlsm"
```

путь к нашему Excel файлу с поддержкой макроса

```
Try
```

```
xlWB = xlApp.Workbooks.Open(iFillFileName)
```

```
Catch ex As Exception
```

```
MessageBox.Show("Неудалось открыть файл "&iFillFileName, "Внимание",  
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)
```

```

Exit Sub

EndTry

Try

xlSht = xlWB.Worksheets("Лист1") 'укажитеимялиста

Catch ex AsException

    MsgBox.Show("Неудалосьнайтиуказанныйлиствфайле
"&iFillFileName, "Внимание", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)

    xlWB.Close(SaveChanges:=True) 'сохраняем файл и закрываем его
    xlApp.Quit() 'закрываем Excel

Exit Sub

EndTry

WithxlSht

    iLastRow = .Cells(.Rows.Count, "A").End(XlDirection.xlUp).row 'номерпо-
следнейзаполненнойстрокивстолбце A

    .Cells(iLastRow + 1, "A").value = Date.Today.ToString("yyyy-MM-dd") 'пе-
реносимданныеодатевстолбцаA

    .Cells(iLastRow + 1, "B").value = Me.TextBox13.Text 'переносимданныеиз
TextBox13 в ячейку столбца B

    .Cells(iLastRow + 1, "C").value = Me.TextBox14.Text      .Cells(iLastRow
+ 1, "D").value = Me.TextBox15.Text      .Cells(iLastRow + 1, "E").value =
Me.TextBox16.Text      EndWith

    xlWB.Close(SaveChanges:=True) 'сохраняем файл и закрываем его
    xlApp.Quit() 'закрываем Excel

```



В подготовленных файлах для построения графиков используются макросы. Алгоритм его работы представлен на рис 5.2.

Код выглядит следующим образом:

```
Subgrafik()  
If Not Worksheets(1).ProtectDrawingObjects Then  
Worksheets(1).DrawingObjects.Delete  
Else  
MsgBox "Удалить графические объекты невозможно"  
EndIf  
ILastRow = Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row  
Range(Cells(2, 2), Cells(ILastRow, 2)).Select  
ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select  
ActiveChart.SetSourceData Source:=Range(Cells(2, 2), Cells(ILastRow, 2))  
ActiveChart.ChartType = xlLine  
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = Range(Cells(2, 1), Cells(ILastRow,  
1))  
ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = Cells(1, 2)  
ActiveChart.SeriesCollection(1).Values = Range(Cells(2, 2), Cells(ILastRow,  
2))  
Range(Cells(2, 3), Cells(ILastRow, 3)).Select  
End Sub
```



Рис. 5.2. Алгоритм построения графиков Excel

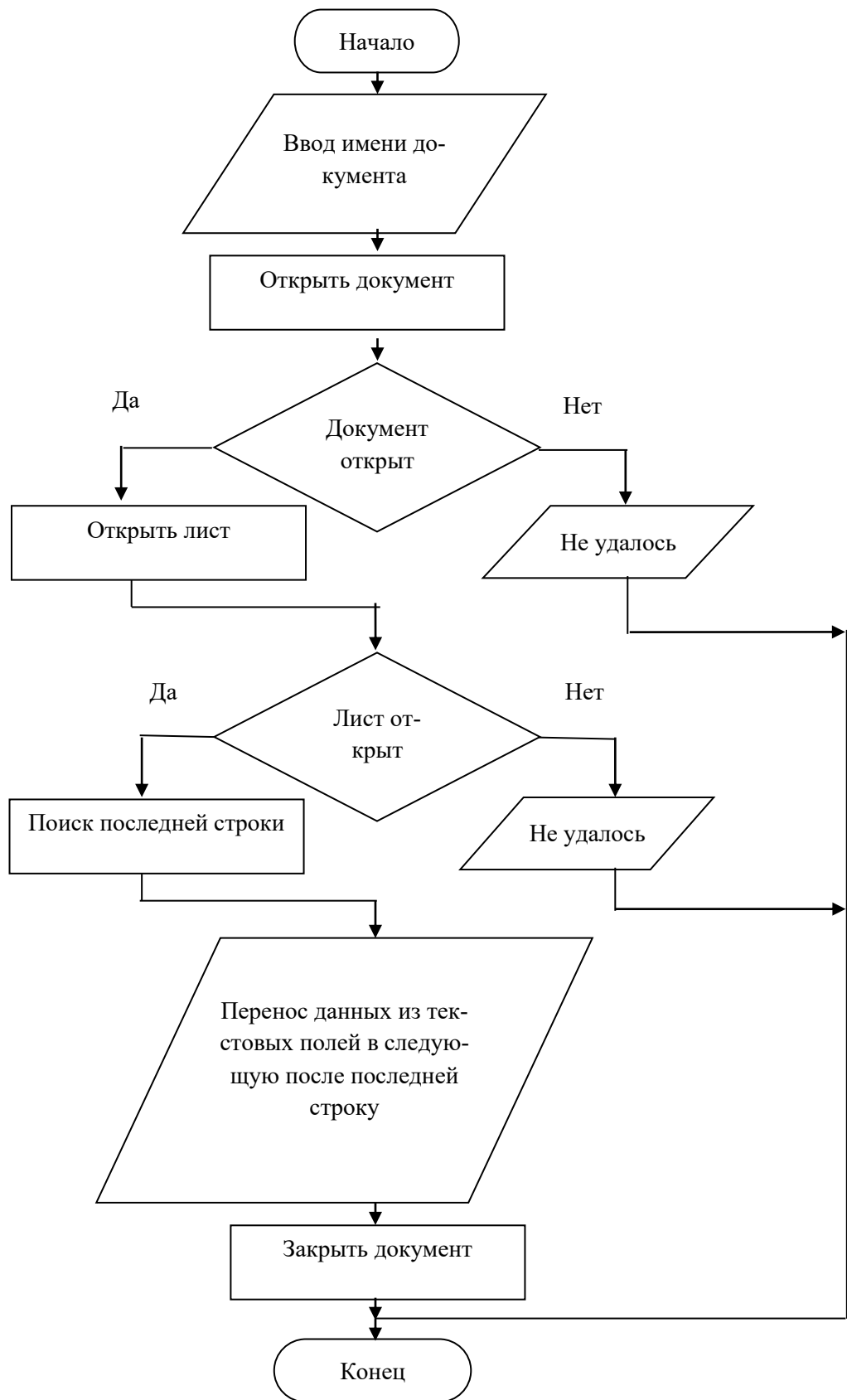


Рис. 5.3. Алгоритм передачи данных в Excel

## 5.2. Описание автоматической системы диагностирования

Программа [132] содержит три формы. На первой (рис. 5.4) осуществляется выбор объектов диагностики, в данном случае представлены два: подвеска автомобиля ГАЗ 24 и система зажигания. Вторая (рис. 5.5) и третья (рис. 5.10) – формы расчёта параметров объектов.

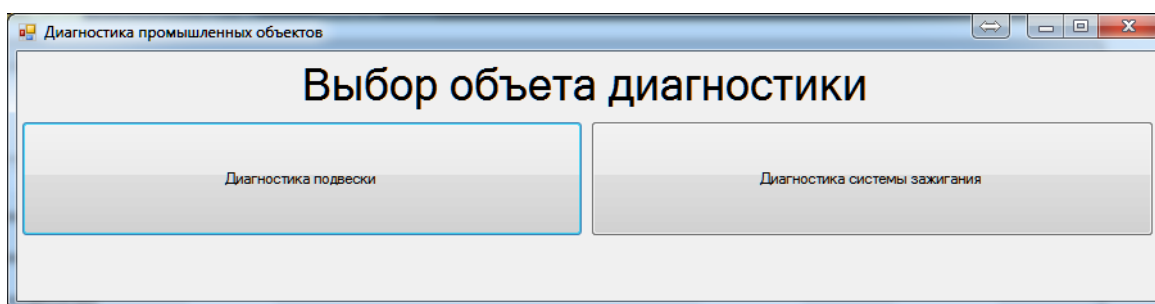


Рис. 5.4. Образец главной формы программы

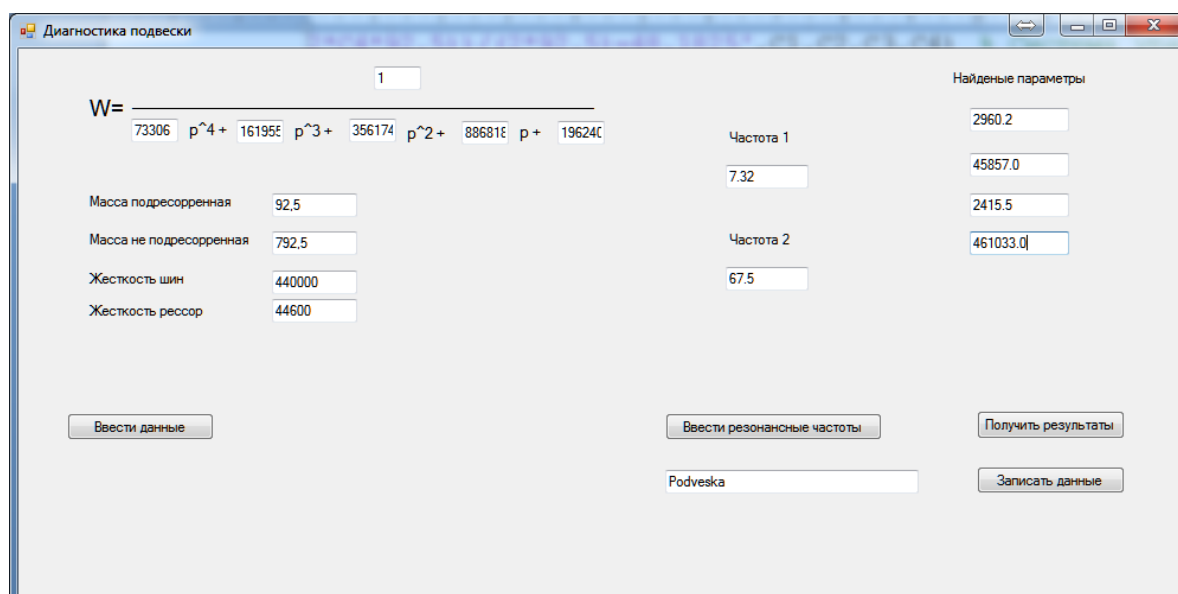


Рис. 5.5. Образец формы «Диагностика подвески»

Общий алгоритм функционирования программы представлен на рис. 5.6.

Форма 2 – «Диагностика подвески».

Входными данными являются: АФЧХ диагностируемой системы, полученная в ходе проведения эксперимента, АФЧХ системы после проведения пробных подключений и номинальные значения исследуемых параметров.

Форму 2 условно можно представить в виде трёх колонок выстроенных в строгой последовательности. Каждая из трех колонок отвечает за определенные действия

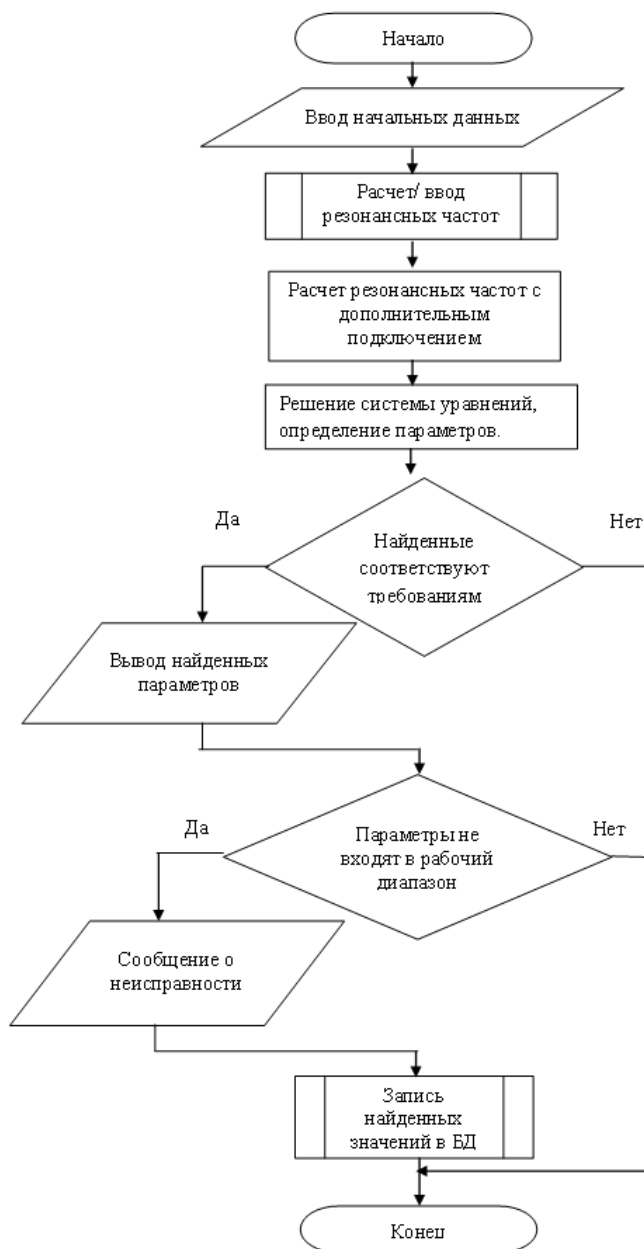


Рис. 5.6 Алгоритм программы

Первая колонка формы 2 служит для ввода начальных данных, таких как коэффициенты передаточной функции, параметров масс и жесткостей. После ввода данных производится создание COM сервера автоматизации MatLab, с

помощью которого производится решение задачи передаточной функции, построение АЧХ (рис. 5.7) и расчёт корней характеристического уравнения, положительная составляющая мнимой части которых является значением резонансных частот. Также резонансные частоты могут быть определены по пикам графика. Полученные значения выводятся во второй колонке текстовых полей.

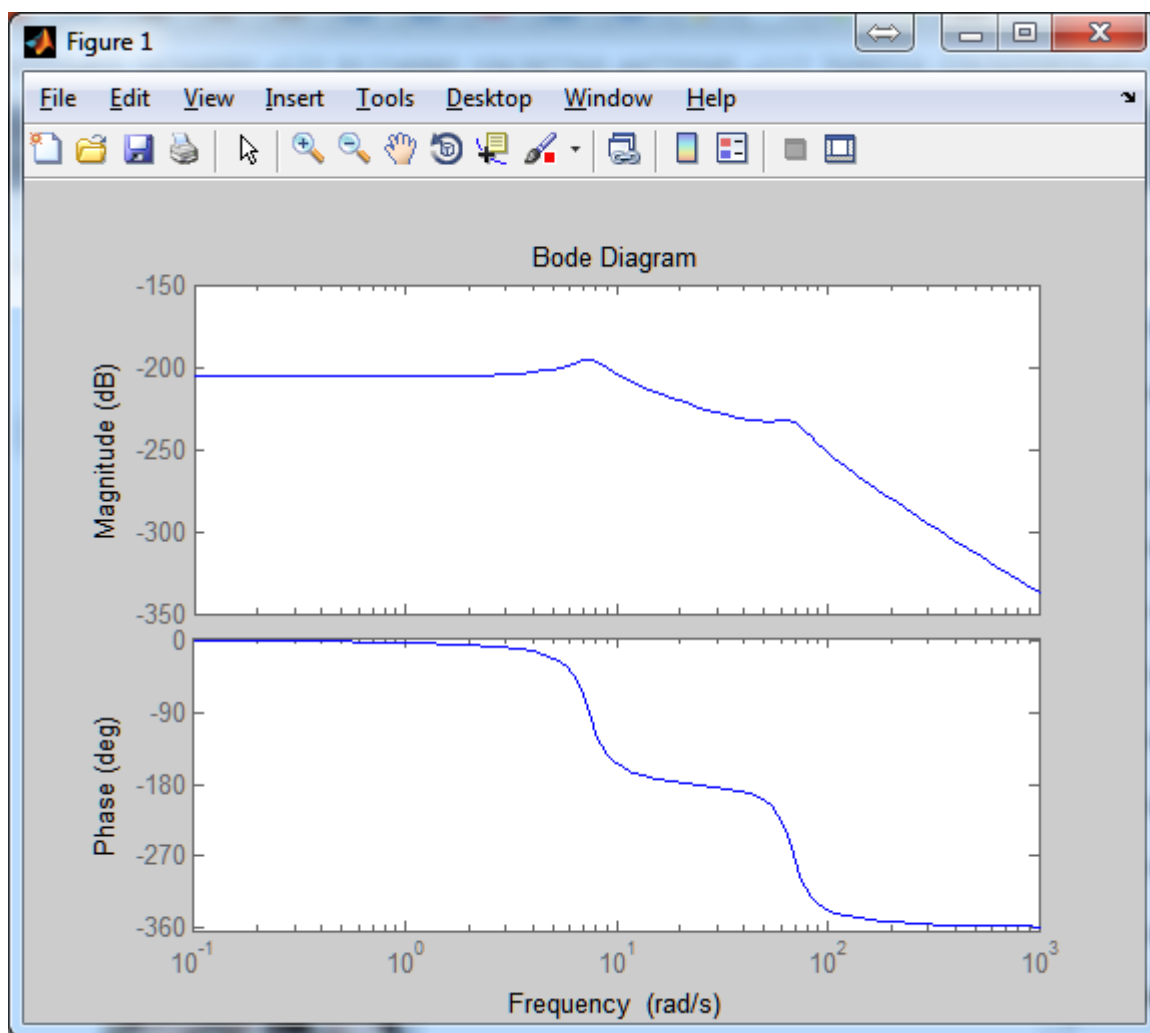


Рис. 5.7. АЧХ и ФЧХ подвески

Значения частот можно откорректировать, например, округлив до требуемой точности либо пропустив расчет ввести, можно например, полученные экспериментальным путём данные. По резонансным частотам находим значения коэффициентов вязкого трения поддрессоренной и неподдрессоренной частей подвески используя формулу (4.12). Реализовано это с помощью символического

решения уравнения в MatLab. Символьные методы позволяют уйти от задания диапазонов вычислений и значительно повысить точность, по сравнению с численными.

Образец реализации символьных вычислений в среде MatLab:

```
Result = MatLab.Execute("S=solve('sqrt((-1)*(C1^2-4*" + CStr(Cr * m2) +  
"))/(2*" + CStr(m2) + ")=" + CStr(w1) + "',C1)");
```

```
Result = MatLab.Execute("S1=double(S)");
```

```
Result = MatLab.Execute("S2=solve('sqrt((-1)*(C1^2-4*" + CStr(Csh * m1) +  
"))/(2*" + CStr(m1) + ")=" + CStr(w2) + "',C1)");
```

```
Result = MatLab.Execute("S3=double(S2)");
```

После чего из символа получаем положительное вещественное число.

Далее находим резонансные частоты с дополнительным пробным подключением, как описано в главе 4.1. Для этого в формулах (4.12) прибавляем известное значение к параметрам вязкости.

$$w3 = \text{Sqrt}(4 * Csh * m1 - (C2 + 100) * (C2 + 100)) / (2 * m1)$$

$$w4 = \text{Sqrt}(4 * Cr * m2 - (C1 + 100) * (C1 + 100)) / (2 * m2)$$

В результате получаем систему из четырёх уравнений, что достаточно для нахождения четырёх неизвестных: значения коэффициентов вязкого трения подрессоренной и непрессоренной частей подвески, суммарная жесткость шин, суммарная жёсткость рессор.

Нажав кнопку «Получить результаты», будет решена система уравнений и в последнюю колонку будут выведены найденные значения параметров. На экран будут выведены только те параметры, которые пройдут эвристический анализ (глава 4.1).

```
Result = MatLab.Execute("Sr=solve('sqrt((-1)*(C1^2-4*C2*" + CStr(m2) +
"))/(2*" + CStr(m2) + ")=" + CStr(w1) + "','sqrt((-1)*(C1^2-2*C2*" + CStr(m2) +
"))/(2*" + CStr(m2) + ")=" + CStr(w4) + "','sqrt((-1)*(C3^2-4*C4*" + CStr(m1) +
"))/(2*" + CStr(m1) + ")=" + CStr(w2) + "','sqrt((-1)*(C3^2-2*C4*" + CStr(m1) +
"))/(2*" + CStr(m1) + ")=" + CStr(w3) + "','C1,C2,C3,C4)")
```

```
Result = MatLab.Execute("R=[Sr.C1 Sr.C2 Sr.C3 Sr.C4]")
```

```
Result = MatLab.Execute("Sr1=double(R)")
```

Если полученные значения будут отличаться больше чем на 10% от заданных, то на экране появится сообщение с предупреждением о неисправности (рис. 5.8).

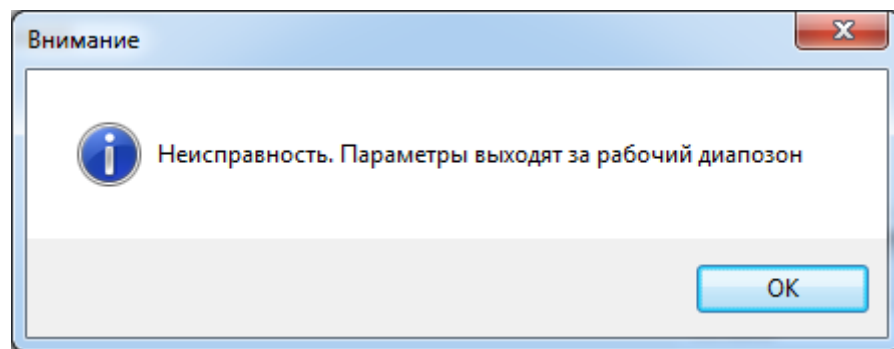


Рис. 5.8 Окно «Сообщение о неисправности»

Полученные результаты рекомендуется записать в Excel файл. В созданном файле записывается информация по соответствующим колонкам с указанием даты формирования результатов и строится график, позволяющий более наглядно следить за состоянием параметров. Пример данных показан на рис. 5.9.



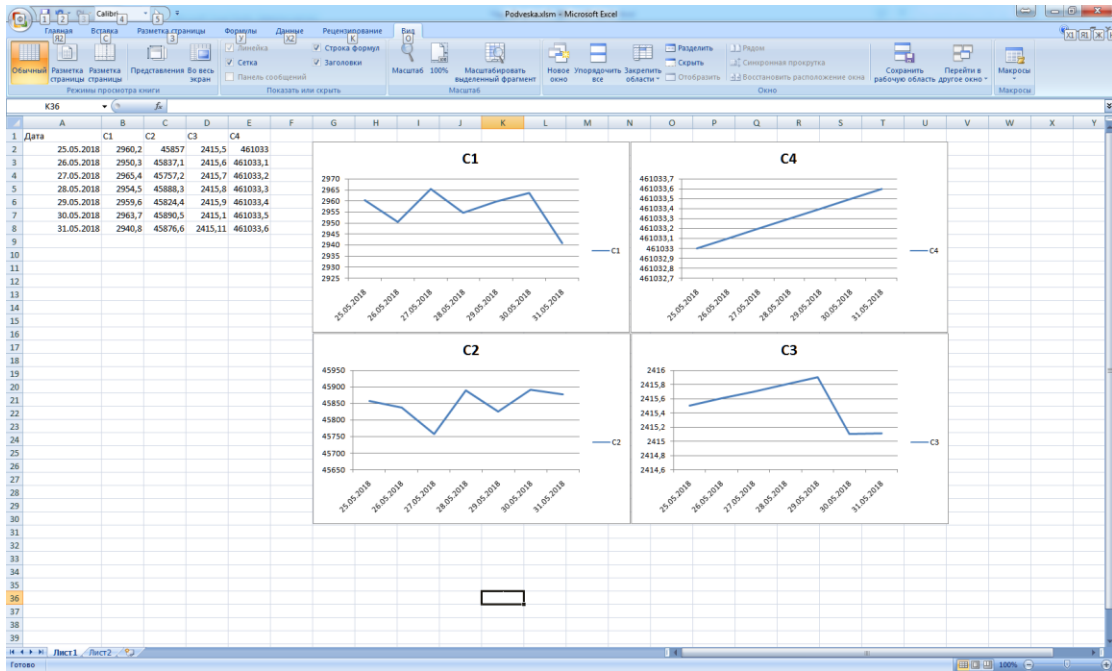


Рис. 5.9 Пример данных мониторинга подвески

Форма 3 – «Диагностика системы зажигания», представлена на рис. 5.10.

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

Индуктивность первичной обмотки   
 Индуктивность вторичной обмотки   
 Емкость конденсатора   
 Емкость высоковольтной цепи   
 Коэффициент взаимоиנדуктивности

Частота 1  Резонансные частоты  Найденные параметры   
 Частота 2

Рис. 5.10. Форма « Диагностика системы зажигания»

Входными данными являются: номинальные параметры системы зажигания (индуктивность первичной и вторичной обмоток катушки зажигания, емкость конденсаторов, емкость, учитывающая распределённую емкость высоковольтной цепи, коэффициент взаимоиנדуктивности), АФЧХ системы до и после пробных подключений.

Диагностика системы зажигания осуществляется аналогично диагностике подвески.

Форму 3 условно можно представить в виде трёх колонок, и выстроенных в строгой последовательности. Каждая из трех колонок отвечает за определенные действия.

В первой колонке формы 3 вводятся начальные данные для расчетов, такие как коэффициенты передаточной функции, индуктивность первичной и вторичной обмоток катушки зажигания, емкость конденсаторов, емкость, учитывающая распределённую емкость высоковольтной цепи, коэффициент взаимной индуктивности.

С помощью MatLab рассчитываются резонансные частоты. Далее по алгоритму, предложенному в четвертой главе диссертации, выполняется определение резонансных частот с учетом пробных подключений и составляется система уравнений.

Решив символьным методом в MatLab полученную систему уравнений, получим набор решений, которые проверяются на соответствие требованиям.

Так же, как и при диагностике подвески автомобиля, данные записываются в Excel, где строятся графики и ведётся мониторинг текущего состояния системы зажигания.

## Выводы

В пятой 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

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 практической диагностики.

4. В процессе идентификации по разработанному автором методу вторичной идентификации могут быть получены передаточные функции, коэффици-

циенты 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, приложение 1). Система успешно внедрена и показывает свою эффективность на предприятиях автодиагностирования ООО АВТОРАЙ (приложение 3). При незначительной модернизации предложенная автоматизированная 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 автоматизированная система, успешно внедрены в учебный процесс по направлению подготовки «Управление и информатика в технических системах» в рамках дисциплины «Идентификация и диагностика технических систем» (приложение 2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заде Л., Дезоер И. Теория линейных систем. – М. Наука, 1970. – 704 с.
2. Schrama R.J.P. Approximate identification and control design with application to a mechanical system: Diss. – Delft, 1992. – XVI, 276 p.
3. Игнатъев А.А. Основы теории идентификации объектов управления: учеб. пособие /А.А. Игнатъев, С.А. Игнатъев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. – 44 с.
4. Адамар Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа. М.: Наука, 1978. — 352 с.
5. Алгоритмы управления и идентификации: Сб. науч. тр./ Ин-т системного анализа; под ред. С.В. Емельянова, С.К. Коровина. – М. диалог МГУ, 1997. – 172 с.
6. Корииков, А. М. Основы теории управления: учебное пособие / А. М. Корииков. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. –392 с.
7. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Физматгиз, 1966. – 624 с.
8. Налимов В.В., Черкова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 440 с.
9. Райбман И.С., Чадеев В.М. Адаптивные модели в системах управления. – М.: Сов.радио, 1966. – 157 с.
10. Аниканов, А. С. Адаптивная идентификация и интерпретация результатов нестационарных гидродинамических исследований с учетом притока продукции в скважине / А. С. Аниканов, П. А. Кемерова, В. Л. Сергеев // Изве-

ствия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 43–46.

11. Корииков, А. М. Интегрированные модели и алгоритмы идентификации систем управления / А. М. Корииков, В. Л. Сергеев // Проблемы современной электроники и систем управления. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. – С. 63–64.

12. Васильцова Н.В. Оценка качества моделей в задачах идентификации и управления непрерывными технологическими объектами: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук.: 05.13.01. – Харьков: Харьк.ин-т радиоэлектроники им. М.К.Янгеля, 1991. – 22 с.

13. Веселая Г.Н., Егорова И.В. О математических моделях технологических процессов, полученных по данным пассивных наблюдений // Сб. докладов: Проблемы планирования эксперимента. – Наука, 1969. С. 45-48

14. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики кибернетических систем. – Рига: Зинатие, 1967. – 540 с.

15. Автушко В.П. Автоматика и автоматизация производственных процессов. М.: Высшая школа, 1985.

16. Лузгин В.В. Исследование системы зажигания как объекта диагностирования на АВМ// Автомобильный транспорт. Научно-технический сборник. – Киев, 1973. – №10. –С.47-53.

17. Лузгин В.В. Методы формирования алгоритмов диагностики аналоговых систем разной физической природы. XVI Научно-техническая конференция: Тезисы докладов. – Братск: - БрИИ, 1995. – С. 59-62.

18. Лузгин В.В. Определение структурных параметров системы зажигания методом пробных подключений. Автоматический контроль и уравнение: Сборник. – Хабаровск, 1974 . – С. 171-176.
19. Лузгин В.В., Патрусова А.М. Экспериментальные исследование объектов как объектов диагностики на аналого-вычислительном комплексе АВК-31: Учебное пособие. – Братск: БрИИ, 1997. – 74 с.
20. Лаврентьев М.А. Об интегральных уравнениях I рода. // ДАН СССР, Т. 127, №1, 1959. С. 31-33.
21. Солодовников В.В., Ленский В.Д. Регуляризация задач статистической динамики систем автоматического управления. – ДАН СССР, Т. 172, № 6, 1967. С. 1293–1295.
22. Тихонов А.Н. О регуляризации некорректно поставленных задач. - ДАН СССР, Т.153, №3, 1963. С. 501-504
23. Гельфандбейн Я.А., Колосов Л.В. Ретроспективная идентификация возмущений и помех. – М.: Сов.радио, 1972. – 232 с.
24. Лузгин В.В., Патрусова А.М. Исследование электротепловых объектов экспериментальными частотными методами//Труды Братского государственного индустриального института. В 2 т. Т.2: Материалы XX научно-технической конф. Братск: БрИИ, 1999. - С. 72-74.
25. Лузгин В.В., Емашов А.В. Прикладные задачи синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования аналоговых промышленных объектов. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. №2(54). 2017. – С. 82-90
26. Александриди Т.М., Матюхин Н.Б. Алгоритмы диагностики в процессе пусконаладочных работ в корпоративных сетях. Инновационные техно-



логии в науке, технике и образовании. Сборник трудов международной научно-технической конференции. М.: МГУПИ, 2007. – С. 40-45.

27. Сапожникова В.В. Основы технической диагностики: учебник/ В.В. Сапожников, В.В. Сапожников, Д.В. Ефанов; под ред. В.В Сапожникова. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. — 423 с.

28. Александриди Т.М., Матюхин Н.Б., Математическая модель поиска неисправностей в вычислительных системах. Вестник МАДИ (ГТУ), №1 2008. – С. 76-81.

29. Бородин С.М. Основы технической диагностики электронных средств : учебное пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – 48 с.

30. M. Manana, A. Arroyo, A. Ortiz, C.J. Renedo, S. Perez, F. Delgado. “Field winding fault diagnosis in DC motors during manufacturing using thermal monitoring”, Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issue 5, April 2011, P. 978-983

31. Ivan Arsie, Cesare Pianese, Marco Sorrentino, "A procedure to enhance identification of recurrent neural networks for simulating air–fuel ratio dynamics in SI engines", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 19, pp. 65, 2006.

32. Карибский В.В., П.П. Пархоменко., Согомонян Е.С. Техническая диагностика объектов контроля. М.: Энергия, 1968. – 82 с.

33. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. М.: Форум - Инфра-М, 2002.

34. Брюле Д.Д., Джонсон Р.А., Клетский Е.Д. Отыскание неисправностей в технических устройствах // Зарубежная радиоэлектроника. – 1967, №7. – С. 123-137

35. Быкодоров А.К., Кульбак Л.И., Лавриненко В.Ю., Ресейкин И.Н., Тихомиров В.Л. Основы эксплуатации радиоэлектронной радиоаппаратуры. – М.: Высшая школа, 1968. – 320 с.
36. Верзаков Г.Ф., Киншт Н.В., Рабинович В.И. Введение в техническую диагностику. – М.: Энергия, 1968. – 224 с.
37. Куликов Г.Б. Основы технической диагностики: учебное пособие/ Г.Б. Куликов. Моск. гос. ун-т печати имени Ивана Федорова. – М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2013. – 168 с.
38. Воронин В.В. Диагностирование технических объектов. – Хабаровск.: Хабар. гос. техн. ун-т, 2002. – 188 с.
39. Лузгин В.В., Патрусова А.М. Алгоритм активной диагностики динамических систем // Труды Братского индустриального института: Материалы XIX научно-технической конф. – Братск: БрИИ, 1998. – С. 210-213.
40. Лузгин В.В., Тарасенко В.И. Методы определения технического состояния машин. Методы прогнозирования качества и надёжности машин и приборов: Сборник. – Ленинград, 1978. – С. 115-117
41. Пономарев Н.Н., Ширяев Е.В., Тюков Н.И. Параметрическая идентификация объектов в системах управления с микроЭВМ: Учеб. Пособие. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 1999. – 55 с.
42. Сергеева (Медведева) Н.А. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления линейными динамическими системами: Автореферат диссертации на соискании ученой степени канд. техн. наук: 05.13.14. – Красноярск: Краснояр. гос. техн. ун-т, 1998. – 22 с.

43. Шаров А.В. Идентификация систем. Методы идентификации. Параметрическая идентификация моделей объектов управления: Учеб.пособие. – М. 1996. – 123 с.
44. Юй Чуньсюань. Разработка и исследование методов идентификации линейных динамических объектов с интервальной неопределенностью в экспериментальных данных: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.01. – М.; Моск.энерг.ин-т., 1991. – 18 с.
45. Корилов, А. М. Адаптивные интегрированные системы идентификации и управления. Вопросы проектирования и развития / А. М. Корилов, Д. В. Севостьянов, В. Л. Сергеев и др. // Электронные средства и системы управления: Труды Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Томск, изд-во ИОА СО РАН, 2005. – С. 58 – 61.
46. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. М.: Форум - Инфра-М, 2002.
47. Малышенко А.М. Математические основы теории систем: учебник для вузов /А.М. Малышенко . – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 364 с.
48. Башарин А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А.В. Башарин, Ю.В. Постников – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. – 511 с.
49. Лузгин, В. В. Модели объектов и методы диагностирования / В. В. Лузгин, Б. И. Лелянов, В. И. Тарасенко // Информационный листок №127-77, Хабаровск, 1977. – 0.2 с.

50. Лузгин, В. В. Исследование системы зажигания как объекта диагностики методом математического моделирования / В. В. Лузгин, Н. С. Сапон // Автомобильный транспорт. 1984. №7. – с. 71-76.
51. Ляпунов, А. М. Собр. соч. Т.2 / А. М. Ляпунов – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 475 с.
52. Лузгин В.В. Прикладной метод активной диагностики аналоговых промышленных объектов / В.Л. Панасов, В.В. Лузгин, Д.С. Колтыгин // Научный вестник НГТУ. – 2008. – №2(31). –С. 171-176.
53. Лузгин, В. В. Вторичная идентификация (VtorId v1.00) / В. В. Лузгин, Д. С. Колтыгин, А. М. Патрусова // Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. N2003612203 25.09.2003
54. Лузгин, В. В. Метод диагностирования системы зажигания автомобилей. Научно-технический сборник “Тракторы и автомобили” / В. В. Лузгин Благовещенск, 1973. – С. 34-40.
55. Панасов В.В. Алгоритм диагностики линейных стационарных промышленных объектов / В.В. Панасов // Современные технологии в машиностроении: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2007. – С. 209-211.
56. Л.Э. Эльсгольц Дифференциальные уравнения и вариационное исчисления. / Л.Э. Эльсгольц – М.: Книга по Требованию, 2012. – 424 с.
57. Лузгин В.В., Говорущенко Н.Я. Метод диагностирования линейных динамических систем. В сб.: Автомобильный транспорт. Техника. -Киев, 1974.- № 11.-С. 62-67.
58. Лузгин В. В. Прикладной метод идентификации динамики промышленных объектов / В.В. Лузгин, В.В. Панасов // Информационные системы

контроля и управления в промышленности и на транспорте: Сб. науч. трудов / Под ред. Ю.Ф. Мухопода – Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2007. – Вып. 15. – С. 36-41

59. Мухопод Ю. Ф. Микроэлектронные информационно-управляющие системы: Учебное пособие / Ю. Ф. Мухопод – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 404 с.

60. Кондратьев В.А., Егорова С.А. Идентификация и диагностика схем и систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 60 с.

61. Алексеев А.А. Идентификация и диагностика систем: учеб. Для студ. Высш. Учеб. заведений / А.А. Алексеев, Ю.А. Кораблев, М.Ю. Шестопапов. – М. : Издательство центр «Академия, 2009 – 352 с.

62. Каримов Д.Р. Устойчивые алгоритмы идентификации объектов управления с запаздыванием на основе реализаций выходных и выходных сигналов. Химическая технология. Контроль и управление – 2016. №4. С. 92-95.

63. Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // Известия вузов. Приборостроение. – 2005, №7. С.15-19.

64. Громов Ю.Ю. и др. Системы автоматического управления с запаздыванием. – Тамбов.: Издательство ТГТУ, 2007. – 76 с.

65. Солодушкин С. И. Идентификация параметров в дифференциальных уравнениях с запаздыванием. Изв. ИМИ УдГУ. 2006. № 2(36), – С. 211-214.

66. Азбелев Н. В. Введение в теорию функционально-дифференциальных уравнений / Н. В. Азбелев, В. П. Максимов, Л. Ф. Рахматуллина – М.: Наука. 1991. – 277 с.

67. Баев А.В., Мельник А.А. Идентификация промышленных объектов по данным их нормального функционирования (часть 1) // Вестник ИрГТУ. 2014. №8 (91). С. 130-136.
68. Мельник А.А., Медунова Е.А. Идентификация промышленных объектов по данным их нормального функционирования (часть 2) // Вестник ИрГТУ. 2015. №12 (107). С. 70-74
69. Бильфельд Н.В. Пассивная идентификация объектов управления средствами toolbox ident // Juvenis scientia. 2016. №3. С. 4-7
70. Стрижнев А.Г., Марков А.В., Русакович А.Н. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы // Доклады БГУИР. 2012. №5 (67). С. 65-72
71. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация систем управления с обратной связью на основе нейросетевого моделирования процессов их функционирования // ИВД. 2017. №2 (45).С. 40
72. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования: Учеб. Пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 64 с.
73. Кордуняну, К. Уравнения с неограниченным последствием / К. Кордуняну, В. Лакшмикантам // Автоматика и телемеханика . – 1985. – №7. С. 5-45
74. Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. Изд 3 // А. Д. Мышкис – М.: Наука, 2014 – 360 с.
75. Хейл, Д.К. Теория функционально-дифференциальных уравнений / Дж. Хейл ; перевод с англ. С. Н. Шиманова. - М. : Мир, 1984. - 421 с.

76. Ульянов А.Д. Методы идентификации и диагностики промышленных объектов: монография / В. В. Лузгин, А. Д. Ульянов. - Братск : БрГУ, 2017. - 146 с
77. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / Р. Отнес, Л. Эноксон М.: Мир, 1982. 430 с.
78. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие для вузов / А. Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 264 с.
79. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
80. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. М.: Форум - Инфра-М, 2002.
81. Программа по идентификации передаточной функции с запаздыванием (Time-DelayIdv.1.00): программа для ЭВМ / Панасов В.В., Колтыгин Д.С., Лузгин В.В. Св.ГР № 2003612203; зарег. в реестре программ 21.01.2008
82. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем.- СПб., 2001. – 388 с.
83. Watanabe T. Robust decentralized turbine-governor control subject to saturation nonlinearity. In: AmericanControlConference, 2002. pp. 948–1953.
84. Eker I'. Hydro-turbine models for robust governor designs in hydro-power generation. In: 2nd InternationalConferenceonResponsiveManufacturing, 2002. pp. 609–613.
85. Jones D, Mansoor SP. Predictive feedforward control for a hydroelectric plant. IEEE TransControlSystTechnol 2004;12:956–65.
86. Лузгин В.В., Колтыгин Д.С. Метод идентификации и диагностики аналоговых объектов // Информационные технологии и проблемы математиче-

ского моделирования сложных систем / Сборник научных статей. – Иркутск: ИИТМ ИргУПС, 2004. Вып.1. – С. 23-30

87. Ульянов А.Д. Идентификация процесса разгона гидроагрегата Братской ГЭС // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. Т. 1. 2015. С. 81-84.

88. Лузгин В.В., Ларионов А С., Панасов В.В. Исследование динамики электротеплового объекта // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: Материалы Межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: ГОУ ВПО “БрГУ”, 2006. – С. 24-25.

89. Каширских В.Г. Диагностика двигателей постоянного тока с помощью искусственной нейронной сети / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев // Вестник КузГТУ. 2014, №2. С. 104-106.

90. Che Soh A. Fault Detection and Diagnosis for DC Motor in Robot Movement System using Neural Network / A. Che Soh, R.Z. Abdul Rahman // The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 10. Number 1. May 2009 (Spring), p.35-42.

91. Arif A. AL-Qassar, Mazin Z. Othman. Experimental determination of electrical and mechanical parameters of dc motor using genetic elman neural network [text] // Journal of Engineering Science and Technology, 2008. – vol. 3, no. 2. P. 190 – 196

92. Березанский Л. М. Положительность функции Коши и устойчивость линейных дифференциальных уравнений с последействием// Дифференц. уравнения. 1990. Т. 26, № 9. С. 1490-1500.

93. Ларионов А. С., Лузгин В. В., Панасов В. В. Устойчивость регулируемой системы с последействием. Труды Братского государственного универ-



ситета. Серия 1. Братск: ГОУВПО “БрГУ”, 2005. 132 с. – (Естественные и инженерные науки).

94. Ларионов А. С., Панасов В. В. Об устойчивости систем автоматического регулирования на примере электротеплового объекта // Вестник Бурятского университета. Серия 13. Математика и информатика. 2006. С. 232-236.

95. Лузгин В.В., Ларионов А С., Панасов В.В. Прикладной метод исследования динамики систем автоматического регулирования с запаздыванием // Научный вестник НГТУ. 2008. №2(31). С. 165-170.

96. Ларионов А.С. Панасов В.В., Об одном подходе к исследованию устойчивости систем автоматического регулирования // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т. 2. Братск: БрГУ, 2006. – С. 24-28.

97. Колмановский В. Б. Уравнения с последействием и математическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. № 4, 1996. С.122-127.

98. Boris Urban. Adoption of automatic identification systems by grocery retailers in the Johannesburg area // Journal of transport and Supply Chain Management 2011. – pp. 120-136.

99. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. Учебное пособие. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 488 с.

100. Ang A.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, desing and technology / IEEE Trims, on Control Syst. Tech., 2005. – Vol. 13. – № 4. – P. 559-576.

101. Astom K.J., Hagglunk T. Advanced PID control // Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006, – 406 p.

102. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // Proc. IFACWorkshop. -Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
103. Ким Д.П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 1. – С. 9-15.
104. Ziegler J.G.. Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers // Trans. ASME, 1942. Vol. 64, – P. 759-768.
105. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method // European Scientific Journal Edition, 2013. – Vol. 9. – № 15. – P. 181-190.
106. Сизых В.Н., Мухопад А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей // Научный вестник Новосибирского | государственного технического университета. - 2014. -№ 1 (54). С. 34-45.
107. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.3 : Синтез регуляторов систем автоматического управления/ под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
108. Прокопьев А. П., Иванчура В. И., Емельянов Р. Т. Методика модального синтеза регулятора системы управления. //Математические методы в технике и технологиях-ММТТ. – 2015. – №. 7. – С. 41-46.
109. Вадутов О. С. Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов.// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2014. – №325(5). – С. 16-22.

110. Бойченко, В. А., Курдюков, А. П., Тимин, В. Н., Чайковский, М. М., Ядыкин, И. Б. (2007). Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры. Управление большими системами: сборник трудов, (19), 23-126.
111. Агеев А.М., Сизых В.Н. Синтез оптимальных регуляторов системы управления самолетом через решение обратной задачи АКОР // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. -2014. -№ 3 (56). - С. 7-22.
112. D. Todd, Batzel, Nicholas C. Becker, M. Comanescu “Analysis of Brushed DC Machinery Faults With Coupled Finite Element Method and Equivalent Circuit Model”, 2011 IAJC-ASEE International Conference, Paper 024, ENG 106
113. M. Manana, A. Arroyo, A. Ortiz, C.J. Renedo, S. Perez, F. Delgado. “Field winding fault diagnosis in DC motors during manufacturing using thermal monitoring”, Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issue 5, April 2011, P. 978-983
114. M. Iorgulescu, R. Beloiu. “Study of DC motor diagnosis based on the vibration spectrum and current analysis”, Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012 International Conference on, p.1-4
115. M. Boltezar, J. Slavi. “Fault Detection of DC Electric Motors Using the Bispectral Analysis”, Springer 2006, Meccanica (2006) 41: 283-297
116. Radojka K., Sanja A., Danilo S. “Recursive Least Squares Method in Parameters Identification of DC Motors Models”, FACTA UNIVERSITATIS, SER.: ELEC. ENERG. December 2005. -vol. 18, no. 3, P. 467-478
117. Mohammed S. Z. Salah. “Parameters identification of a permanent magnet dc motor” //The Islamic University of Gaza, 2009. -94 с.

118. Vijaylakshmi Jigajinni S. "Simulation of Incipient Fault Detection, Confirmation and Diagnosis Using Kalman Filter", International Journal of Science and Research, Volume 3 Issue 8, August 2014, p.1846-1850
119. WEI Tong. "Application of adaptive Kalman filtering in system identification of brushless DC motor", WEI Tong,Rui GUO/Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 08 August 2012
120. L. Dinca ; T. Aldemir ; G. Rizzoni "A model-based probabilistic approach for fault detection and identification with application to the diagnosis of automotive engines" IEEE Transactions on Automatic Control Volume: 44 , Issue: 11 , Nov 1999 pp: 2200 - 2205
121. Yue Youjun, Li Xiang, Zong Qun, "Development of automobile fault diagnosis expert system based on fault tree — Neural network ensemble", Electronics Communications and Control (ICECC) 2011 International Conference on, pp. 2028-2031, 2011.
122. Chi Man Vong, Pak Kin Wong, Ka In Wong, "Simultaneous-fault detection based on qualitative symptom descriptions for automotive engine diagnosis", Applied Soft Computing, vol. 22, pp. 238, 2014.
123. Adel Haghani, Torsten Jeansch, Mathias Roepke, Steven X. Ding, Nick Weinhold, "Data-driven monitoring and validation of experiments on automotive engine test beds", Control Engineering Practice, vol. 54, pp. 27, 2016.
124. Лузгин В.В. Системный анализ диагностической информации промышленных объектов / В.В. Лузгин // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Москва – 2010. – № 4(23). – С. 67-73.

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

126. Ulyanov A.D. "Applied Method for Identification and Diagnosis of Automatic DC-Motor Speed Control Systems", 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (2019) Pages: 1-4

127. Набоких, В.А. Аппараты систем зажигания: справочник / В.А. Набоких. М.: Академия, 2009. – 320 с.

128. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля/ Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.

129. Кузнецов В.А., Дьяков И.Ф. Конструирование и расчет автомобиля. Подвеска автомобиля. Учебное пособие. Кузнецов В.А., Дьяков И.Ф. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 64 с.

130. Лузгин В.В. Структура, формирование и функционирование эвристических программ диагностирования промышленных объектов / В.В. Лузгин // Вестник московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). Москва – 2009. – № 4(19). – С. 25-29.

131. <https://www.mathworks.com/help/MatLab/call-MatLab-com-automation-server.html>

132. 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.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019667480

Диагностика промышленных объектов

Правообладатели: *Седельников Илья Андреевич (RU), Колтыгин Дмитрий Станиславович (RU), Ульянов Александр Дмитриевич (RU)*

Авторы: *Седельников Илья Андреевич (RU), Колтыгин Дмитрий Станиславович (RU), Ульянов Александр Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2019663790

Дата поступления 21 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 24 декабря 2019 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

«Утверждаю»

Первый проректор

ФГБОУ ВО «БрГУ»



 В.А. Иванов

«16» 02. 2020 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы А.Д. Ульянова на тему «Формирование автоматической системы диагностирования колебательных промышленных объектов с запаздыванием», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Комиссия кафедры «Управления в технических системах» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Братский государственный университет» в составе заведующего кафедрой к.т.н., доцента И.В. Игнатьева, к.т.н., доцента Т.А. Григорьевой, и к.т.н., доцента Д.С. Колтыгина составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы А.Д. Ульянова, посвященной формированию автоматической системы диагностирования, а именно – автоматическая система диагностирования промышленных объектов (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2019667480), резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов, метод вторичной идентификации промышленных объектов с запаздыванием использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 27.03.04 «Управление и информатика в технических системах» по дисциплине «Идентификация и диагностика технических систем» и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Акт внедрения рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Управления в технических системах» 06 февраля 2020г., протокол № 5

Зав.кафедрой «Управления  
в технических системах»,  
к.т.н., доцент



И.В. Игнатьев

к.т.н., доцент



Т.А. Григорьева

к.т.н., доцент

Д.С. Колтыгин



### ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Утверждаю

Ген. директор ООО «АВТОРАЙ»

 А.А. Дедюхин  
«03» июня 2019 г.

#### АКТ

О практическом применении полученных результатов диссертационного исследования Ульянова А.Д. на тему «Формирование автоматической системы диагностирования колебательных промышленных объектов с запаздыванием»

Настоящим Актом удостоверяется, что в нашей компании тщательно изучены теоретические и практические разработки диссертационного исследования Ульянова А.Д., в том числе резонансный метод диагностирования и автоматизированная система диагностирования промышленных колебательных объектов.

Хотелось бы отметить, что большинство существующих методов диагностирования колебательных объектов предполагают сложный алгоритм или дорогое оборудование для получения анализа, тогда как разработанная Ульяновым методика диагностирования позволяет получить информацию о техническом состоянии исследуемого объекта, только по значениям резонансных частот.

Внедрение автоматизированной системы диагностирования позволило сократить время формирования диагноза о техническом состоянии объекта и увеличить точность полученных данных. Что, как следствие, введет за собой увеличение прибыли всего предприятия.

Результаты диссертационного исследования Ульянова А.Д. были использованы нашей компанией при проведении диагностирования подвесок и систем зажигания легкового и грузового автотранспорта.

Генеральный директор  
ООО «АВТОРАЙ»

