

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Керченский государственный морской технологический университет»

ЗИНЧЕНКО АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ

Номинация: «Информатика, кибернетика и электроника»

«Улучшение показателей энергетических установок с использованием регулятора нечеткой логики (на примере паромов Республики Крым)»

Научная работа
для участия в конкурсе
на соискание премии
Республики Крым «За научные
достижения в сфере
приоритетных направлений
развития Крыма»
Магистра 1 курса
Факультета Морской

Керчь, 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ.....	9
1.2 ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ	13
1.3 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ГА	25
1.4 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	30
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГДГА ПАРОМА....	31
2.1 МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	31
2.2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГДГА ПАРОМА	34
2.3 ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ГЕНЕРАТОРАМИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ	39
2.4 ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ ГДГА.....	45
2.5 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	53
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ	54
ВРАЩЕНИЯ ГДГА ПАРОМА И СУДОВ.....	54
3.1 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ.....	54
3.2 АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ГДГА...	61
3.3 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	73
РАЗДЕЛ 4 РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА.....	74
4.1 УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА	74
4.2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГД.....	81
4.3 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА	85

4.4 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	110

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время паромная переправа является стратегическим объектом повышенного внимания. Керченская паромная переправа (переправа «Крым — Кавказ») — морская паромная переправа через Керченский пролив, функционировавшая с 1954 г. Но так же на территории Республики Крым функционировали паромы в портах Севастополь и Ялта. Сегодня, после событий осени 2022 года паромная переправа так же выполняет сверхфункции загрузки и транспортировки по обеспечения связи между регионом и материковой частью России. Повышение эксплуатационных функций паромов и продолжительности периода загрузки системы является одним из ключевых вопросов для обеспечения стабильного и безопасного управления паромов.

Существует повышенный интерес к средствам и способам активного управления генерированием и потреблением неактивных потоков энергии по заданному закону для придания требуемых свойств автономным системам. При высокой степени автоматизации на судах мирового флота актуальной остаётся задача повышения эффективности автоматического управления качеством электроэнергии на них. Эта проблема возникла вследствие того, что в судовых автономных электроэнергетических системах (ЭЭС) получают все более широкое применение полупроводниковые преобразователи электроэнергии. Мощные полупроводниковые преобразователи используются в электродвигательных комплексах постоянного и переменного тока, винто-рулевых комплексах, лебедках. При всех достоинствах подобных систем, отличающихся высокой надежностью, низкой стоимостью и простотой алгоритмов управления, уже не одно десятилетие стоит проблема влияния мощных тиристорных и вообще полупроводниковых преобразователей электроэнергии на питающие их сети и на устройства, питающихся от данных сетей.

Специфика рассматриваемых автономных ЭЭС заключается в ограниченности их мощности и отсутствии нулевого провода – конфигурации автономной ЭЭС с изолированной нейтралью. Подобные сети характеризуются искажениями форм токов и напряжений в несколько раз превышающими значения, допускаемые нормативной документацией, что нарушает нормальную работу средств автоматики и вызывает потери в ЭЭС. Данные особенности делают малоэффективным, а порой и недопустимым использование на водном транспорте средств фильтрации, применяемых на береговых предприятиях. Малоэффективны как пассивные, так и активные средства компенсации искажений, такие как фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ). Последние, для эффективного применения в составе ЭЭС водного транспорта требуют адаптации их систем управления к особенностям судовых сетей. Это вызывает необходимость решения двух актуальных проблем автоматизации процесса управления качеством электроэнергии в автономных сетях. Перспективной в данном направлении является реализация непрерывного автоматического контроля качества электроэнергии на судне на основе интеллектуальных систем принятия решений.

Затронутым вопросам посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов, работы которых указаны в литературном перечне.

Поставленные вопросы вызывают необходимость поиска новых решений по проблеме повышения эффективности и оптимизации систем управления средств повышения качества электроэнергии в автономных ЭЭС водного транспорта.

Цель магистерского диссертационного исследования состоит в решении актуальной научной задачи повышения эффективности управления параметрами электроэнергии в автономных электроэнергетических системах с нелинейной нагрузкой на пароме.

В соответствии с указанной целью в диссертации сформулированы, обоснованы и решена **главная задача** исследования: многокритериальная оптимизация управления качеством электроэнергии в автономных ЭЭС паромов посредством ФКУ при наиболее эффективном использовании его установленной мощности.

Для выполнения поставленной цели также потребовалось решение следующих **вспомогательных задач:**

- реализация интеллектуальной системы принятия решений посредством адаптивной нейро-нечеткой системы вывода;
- реализация оптимального управления ФКУ на основе интеллектуальной системы принятия решений на расширенных множествах по векторному критерию;
- реализация устройства идентификации нестационарного гармонического состава несинусоидальных токов и напряжений в режиме реального времени на основе ПЛИС;
- разработка метода идентификации нестационарного гармонического состава несинусоидальных токов и напряжений в режиме реального времени;
- идентификация и контроль параметров системы оптимального управления ФКУ;
- описание способов регулирования показателей неактивной мощности в ЭЭС водного транспорта.

Объектом исследования в работе являются автоматические системы управления качеством электроэнергии в автономных ЭЭС паромов безового и ледового класса.

Предметом исследования – модели, методы и средства повышения эффективности автономных ЭЭС с мощной нелинейной нагрузкой.

Методы исследования: теории электрических цепей для анализа процессов преобразования электрической энергии в ЭЭС; теории автоматического регулирования; ряды Фурье; методы анализа систем с позиции «переменных состояния»; принципы многокритериальной оптимизации; методы прямых и косвенных экспериментальных измерений при анализе процессов протекающих в исследуемой системе; теория нечетких множеств и искусственных нейронных сетей.

Научная новизна диссертации заключается в том, что получены и **выносятся на защиту** следующие новые научные результаты:

1. Многокритериальная оптимизация процесса автоматического управления качеством электроэнергии в автономных ЭЭС с нелинейной нагрузкой на основе

разработанной интеллектуальной системы принятия решений, которая по сравнению с известными системами позволяет: снизить необходимую установленную мощность ФКУ и действуя по условию её полного использования обеспечивать максимальное значение обобщенного показателя качества при оптимизации всех регулируемых параметров электроэнергии; структура и алгоритм, использованные при синтезе системы принятия решений, позволяют отказаться от классических методов свертки к скалярному критерию и необходимости использовать генетические и другие «медленные» алгоритмы поиска оптимальных решений, что значительно увеличивает скорость работы разработанной системы для паромов Керченской паромной переправы.

При этом **получили дальнейшее развитие:**

– методы построения адаптивных фильтров для автоматических систем управления силовых преобразователей, компенсаторов реактивной мощности и мощности искажений, а также систем автоматического регулирования параметров электроэнергии автономных ЭЭС;

– способы управления фильтро-компенсирующими устройствами;

– вычислительные алгоритмы работы системы управления качеством электроэнергии.

Усовершенствовано:

– способ управления автоматическими регуляторами дизель-генераторных агрегатов автономных ЭЭС в условиях несинусоидальности сетевых токов и напряжений;

– метод формирования опорных сигналов для систем управления источников и преобразователей электроэнергии в условиях искаженности токов и напряжений питающей сети.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

– разработанные методы и средства активной фильтрации напряжения на шинах электроснабжения, обеспечивающие совместную работу резкопеременных мощных нагрузок с чувствительными к искажению напряжения питания элект-

троприёмниками, позволяют осуществить новые подходы к проектированию судовых и других автономных электроэнергетических систем;

– оригинальный способ построения систем управления устройств компенсации мощности искажения позволяет улучшить показатели фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечить эффективную работу известных компенсаторов реактивной мощности и систем управления полупроводниковых преобразователей, нормальная работа которых затруднена в условиях сильных искажений токов и напряжений сети;

Для осуществления моделирования и обработки экспериментальных данных были использованы пакеты программ «MathCad», «MATLAB».

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью использования математического аппарата и компьютерного моделирования, демонстрирующих эффективность предложенных методов и алгоритмов в задачах управления параметрами качества электроэнергии в автономных ЭЭС водного транспорта.

Реализация и внедрение полученных результатов. Реализация научных результатов, предложений, выводов и рекомендаций подтверждается актами внедрения их практического использования в производственный процесс: автопарома «Ейск», «Керченский-2», «Лаврентий», «Мария».

Тема диссертационной работы соответствует планам выполнения научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «КГМТУ»

РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Особенности параллельной работы генераторов

Режим параллельной работы генераторных агрегатов (ГА) в автономных условиях имеет существенные отличия от режима параллельной работы агрегатов на неавтономных электростанциях. Однако данные отличия, оказывающие основное влияние на устойчивость работы систем, мало и поверхностно описаны в литературе.

Рассмотрим условия обеспечения статической устойчивости 1-го рода при работе береговых электростанций и электростанций автономных морских объектов: судов, паромов и т.д.

Как известно, в настоящее время отдельные электростанции объединяются в большие системы, причем между станциями существуют протяженные линии электропередач, обладающие значительными реактивными сопротивлениями x_r .

В принципе возможные схемы параллельной работы станций в автономных условиях могут быть сведены к трем схемам [23, 26, 27, 60, 127, 128]:

– схема "станция – шины" неизменного напряжения и частоты с простой связью (рисунок 1.1, *а*), т. е. при отсутствии на электропередаче, связывающей эту станцию с приемной системой, промежуточных отборов мощности и при $\frac{P_{c\Sigma}}{P_1} \geq 10$,

где $P_{c\Sigma}$ и P_1 – установленные мощности соответственно приемной системы и передающей станции; схема "станция – шины" неизменного напряжения и частоты со сложной связью (рисунок 1.1, *б*), т. е. при наличии на электропередаче местных или промежуточных отборов мощности;

– схема "станция – шины" в общем случае со сложной связью (рисунок 1.1,в) при $\frac{P_c \Sigma}{P_1} < 10$.

Общим для всех этих схем является наличие реактивного сопротивления линии электропередачи x_n , которое вносит определенную особенность в расчеты, играет существенную роль в вопросах устойчивости параллельной работы береговых систем.

Эта особенность может быть обнаружена при рассмотрении наиболее простого случая работы генератора на шины неизменного напряжения и частоты в береговых и судовых условиях (в соответствии с рисунок 1.1, в).

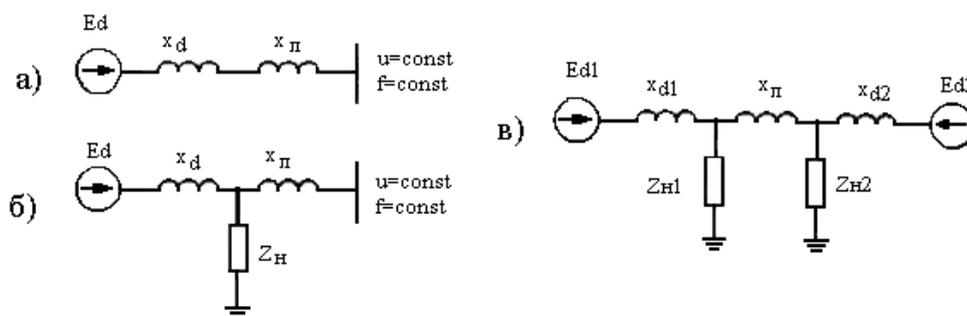


Рисунок 1.1 – Схемы подключения генераторов

Как показано в работах [22, 25, 35, 36, 37], при передаче номинальной нагрузки угол $\delta_{1ном}$ в этих условиях (при $x_n = 0$) составляет $10 - 25^\circ$.

Предел передаваемой генератором мощности определится из известного условия: $\delta_1 = 90^\circ$, т. е. $P_{1пред} = \frac{E_d u}{x_d} \sin 90^\circ = \frac{E_d u}{x_d}$.

Запас устойчивости k_{c1} этой системы при условии, что $E_d = const$, равен:

$$k_{c1} = \frac{P_{1пред} - P_{1ном}}{P_{1ном}} = \frac{P_{1пред}}{P_{1ном}} - 1 = \frac{E_d u x_d}{x_d E_d u \sin \delta_{1ном}} - 1 = \frac{1}{\sin(25 \div 10)^\circ} - 1 = 1,36 \div 4,7. \quad (1.1)$$

В береговых условиях (при $x_n \neq 0$) активная мощность, может быть определена по формуле: $P_2 = \frac{E_d u}{x_d + x_n} \sin \delta_2$.

В современных энергосистемах угол δ_2 при передаче генератором номинальной мощности составляет $50 \div 55^\circ$ [21, 23, 33], поэтому запас устойчивости системы k_{c2} в этих условиях при $E_d = const$ будет:

$$k_{c2} = \frac{P_{1пред}}{P_{1ном}} - 1 = \frac{E_d u (x_d + x_n)}{(x_d + x_n) E_d u \sin \delta_{1ном}} - 1 = \frac{1}{\sin \delta_{2ном}} - 1 = 0,3 \div 0,2.$$

Таким образом, отсутствие длинных линий передач в СЭС обеспечивает для этих станций, в отличие от береговых станций, большой запас статической устойчивости 1-го рода.

Следовательно, предельная мощность, которая может быть получена от судового ГА, в нормальных режимах не может быть больше $P_{max} = 1,1 \div 1,35 P_{ном}$, т. е. в самом неблагоприятном случае (при $k_c = k_{cmin}$) согласно выражению (1.1) у генератора будет почти двойной запас по мощности:

$$\frac{P_{1пред}}{P_{max}} = \frac{2,36 P_{ном}}{1,35 P_{ном}} \approx 1,75.$$

Обеспечение статической устойчивости 2-го рода – одно из важнейших условий работы агрегатов и автономных электростанций. Для автономных электростанций постановка этого вопроса связана с введением производных для форсировки возбуждения с целью удержания ГА в синхронизме при сильных возмущениях.

Для АЭС вопрос обеспечения устойчивости 2-го рода связан с повышением требований к точности регулирования. Действительно, одной из специфических особенностей АЭС является соизмеримость мощностей ГА и потребителей. Поэтому в системе при включении и отключении потребителей наблюдаются большие отклонения напряжения и частоты. Чтобы уменьшить эти отклонения, повышают быстродействие и увеличивают коэффициенты усиления систем регулирования частоты вращения и напряжения.

Значительную роль в возникновении колебаний в системе играют возмущающие силы, действие которых, в зависимости, от их происхождения, сказывается или на моменте, развиваемом первичным двигателем, или на электромагнитном моменте.

Кроме того, из-за соизмеримости мощностей агрегатов в АЭС с мощностью отдельных потребителей имеются периодические возмущения со стороны нагрузки при работе импульсных потребителей, в режиме погрузо-разгрузочных работ и т.д. Поэтому практически в каждой АЭС, предусматривающей параллельную работу ГА, присутствуют вынужденные колебания, амплитуда которых определяется близостью частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний системы.

В результате анализа литературных источников, в которых описаны экспериментальные исследования колебательных процессов в СЭЭС [23-25, 148] установлено, что обычно частота свободных колебаний находилась в диапазоне $0,05 \div 0,2$ Гц, а амплитуды обменных колебаний на мощности достигает до 5 % от мощности ГА.

Анализируя описанные в [22-30, 90, 128] данные, можно установить, что в СЭЭС могут быть следующие виды колебательных явлений:

- свободные колебания, обусловленные действием систем автоматического регулирования и непериодическими вынужденными силами;
- автоколебания, обуславливаемые неустойчивостью тех или иных контуров регулирования и наличием в них нелинейностей;
- вынужденные колебания, вызываемые действием вынужденных сил и близостью частоты этих сил к резонансной частоте системы;
- комбинационные колебания, происходящие вследствие интерференции колебаний в системе.

Колебания могут проявляться как в отдельных (при отсутствии колебаний в других контурах), так и во всех (или в большинстве) контурах системы.

1.2 Задачи повышения точности регулирования частоты вращения ДГ

1.2.1 Методы и устройства стабилизация частоты вращения ДГ

Автоматическое регулирование частоты вращения ДГ зарекомендовало себя эффективным средством повышения уровня статической и динамической устойчивости ЭЭС. Основу современной теории устойчивости в своих трудах разработали такие выдающиеся ученые, как С.А. Антонович [9], П.А. Мещанинов [94], В.А. Михайлов [96, 97] и позднее развиты такими учеными: И.Г. Беляев [16], В.С. Архангельский [10], Ю.В. Баков [12], А.П. Баранов [14, 15], В.С. Богомоллов [20], Д.А. Бут [27], М.В. Васильев [29], Л.П. Веретенников [32, 33], Е.С. Ковалевский [68], М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев [89], А.Н. Ткаченко [132, 133], В.П. Топорков, Д.Ю. Копытов [136] и др.

Системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения относятся к системам стабилизации. Системы автоматической стабилизации регулируемой могут быть статическими и (или) астатическими по отношению к внешнему

воздействию. Первая из них обеспечивает установившееся значение регулируемой величины, зависимое от внешнего воздействия, вторая – не зависимое. В САР частоты вращения дизелей внешним воздействием является мощность, приложенная к выходному валу, которая равна активной мощности, отдаваемой генератором, деленной на КПД генератора.

Для ГА применяют два основных принципа регулирования частоты тока: по мгновенному отклонению регулируемой величины (частоты); по мгновенному отклонению частоты и возмущающему воздействию (нагрузке).

ДГ, оборудованные обычными механическими регуляторами с гибкой обратной связью, не обеспечивают пропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, вследствие их астатических скоростных характеристик [1-4, 19, 31, 54, 55, 85, 87, 106, 137-140].

Развитие компьютерной техники и электронных технологий позволили создать современные системы электронного управления двигателями, с помощью которых оказалось возможным удовлетворять повышенные требования к тепловым двигателям.

По мере создания новой электронной элементной базы средств автоматики, в том числе микропроцессорных устройств, появляется возможность реализации на их основе комплексных систем автоматического регулирования ГА, выполняющих наряду с другими функции регулирования частоты вращения. В этом случае единый электронный блок повышенной эксплуатационной надежности может осуществлять все операции по управлению и регулированию ГА [6-9, 44-47, 81, 91, 92].

Для идеальной системы регулирования дизеля, в которой нет инерционных и постоянных (чистых) запаздываний и регулирование происходит только по отклонению скорости, механический момент является чисто демпферным, пропорциональным производной угла. При появлении в системе запаздываний по времени и, следовательно, сдвига по фазе, в механическом моменте появляется синхронизирующая составляющая. При гармонических колебаниях роторов обе составляющие момента изменяют свой знак, т. е. проходят нулевое положение через

половину периода колебаний. При этом демпферный момент становится раскачивающим, система выходит на границу устойчивости.

Повышение устойчивости ДГ за счет увеличения маховых масс (инерционной постоянной) ротора нерационально по конструктивным соображениям. Дополнительное воздействие на электромагнитный момент генератора путем изменения его параметров и параметров его регулятора возбуждения способно ухудшить качество электроэнергии по напряжению. Дизелестроительные заводы ограничены конструктивными возможностями оптимизации постоянных времени звеньев РЧВ. Поэтому представляется целесообразным исследовать возможность и эффективность повышения запаса и других показателей устойчивости параллельной работы ГА за счет специального дополнительного регулирования первичных двигателей.

Одним из основных направлений повышения эффективности САР частоты вращения дизелей является разработка и использование научно-обоснованных решений по совершенствованию технического обслуживания регулятора частоты вращения (РЧВ) непрямого действия в составе САР частоты вращения дизеля. В связи с этим разработка новых способов повышения надежности РЧВ, совершенствования их технического обслуживания является актуальной задачей в современных условиях.

Совершенствование показателей РЧВ сдерживает недостаточная изученность: большого многообразия взаимодействующих процессов внутри САР частоты вращения и возмущений со стороны окружающей среды в различных условиях эксплуатации; причин и факторов изменения технического состояния РЧВ, статических и динамических характеристик РЧВ с изменением его техническим состоянием [11, 12, 65-74, 98]. Практика исследования и проектирования указывает на недостаточное использование для совершенствования конструкции РЧВ непрямого действия методов математического программирования и оптимизации. Следующим направлением является развитие адаптивных принципов выбора настроечных параметров регуляторов, применение активных методов идентификации динамических объектов в реальном времени, базирующихся на построении моделей

энергосистемы по экспериментальным данным. Идентификация параметров ДГ для целей адаптации настроек АРВ осуществляется с помощью режимных частотных характеристик, обусловленных реакцией системы на воздействие в виде ступенчатой функции. При построении самонастраивающихся регуляторов используются методы параметрической идентификации, которые способны отслеживать изменения параметров и не требуют подачи возмущений на объект - наличие естественных флуктуации режима оказывается достаточным [5, 10, 13, 18, 59, 108, 111].

1.2.2 Двигатель внутреннего сгорания как объект регулирования

Исследования динамических свойств объекта сводится к нахождению вида его переходной функции. Решая такую задачу, следует установить, к какому из типовых динамических звеньев может быть отнесен объект и каковы временные постоянные в дифференциальном уравнении такого звена. Динамической модели собственно дизеля посвящены исследования авторов [67-74, 76-79, 83, 84, 144]. В случае дизеля мы имеем дело с одним аккумулятором энергии – с маховыми вращающимися массами. Уравнение равновесного режима:

$$M_{k0} = M_{c0} \quad , \quad (1.2)$$

где M_{k0} , M_{c0} – соответственно установившиеся значения крутящего момента и момента сопротивления.

Уравнение движения в переходном режиме на основании принципа Даламбера запишется так:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для разгона} \\ \text{для замедления} \end{array} \right\} \begin{array}{l} J \frac{d\Omega}{dt} = M_k - M_c \quad , \\ J \frac{d\Omega}{dt} = M_c - M_k \quad . \end{array} \quad (1.3)$$

Уравнение в вариациях будет получено путем вычитания из (1.3) уравнения (1.3). В дальнейшем будем рассматривать первое из уравнения (1.3) как основное. Тогда

$$J \frac{d(\Delta\Omega)}{dt} = \Delta M_k - \Delta M_c, \quad (1.4)$$

причем, поскольку $\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega$ то $d\Omega = d(\Delta\Omega)$, где Ω_0 – угловая скорость вращения в равновесном режиме; Ω – текущая координата угловой скорости; J – приведенный к оси вала момент инерции всех вращающихся масс.

Динамические свойства дизеля по каналу нагрузочного возмущения.

При этом исследовании координата регуляторного воздействия принимается неизменной. В общем случае $M_k = f(g_{\text{ц}}, \Omega)$, а $M_c = f(\Omega, L)$, где $g_{\text{ц}}$ – координата регуляторного воздействия, однозначно связанная с ходом топливной рейки, а поэтому $M_k = f(h, \Omega)$ – координата нагрузочного воздействия (например, проводимость цепи электрической нагрузки, или коэффициент D).

Для канала нагрузочного возмущения следует принять $M_k = f(\Omega)$, $M_c = f(\Omega, L)$, так как $g_{\text{ц}} = \text{const}$.

Тогда уравнение (1.4) после разложения приращений функций M_k и M_c в ряд Тейлора по приращениям аргументов и использования первого (линейного) приближения получит вид:

$$J \frac{d(\Delta\Omega)}{dt} = \left. \frac{\partial M_k}{\partial \Omega} \right|_{\Omega_0} \Delta\Omega - \left. \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} \right|_{\Omega_0} \Delta\Omega - \left. \frac{\partial M_c}{\partial L} \right|_{L_0} \Delta L.$$

Переходя к относительным координатам:

$$y_0 = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_N} \text{ и } \mu = \frac{\Delta L}{L_N},$$

где ω_N и L_N – соответственно номинальные значения угловой скорости и параметра нагрузки, получим уравнение простого апериодического звена:

$$T_\mu \frac{dy_0}{dt} + y_0 = -k_{0\mu} \mu,$$

где $T_\mu = J/F_d$ – постоянная времени двигателя, сек.;

$$F_d = \left(\left| \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \Delta\Omega - \left| \frac{\partial M_l}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \right) \Delta\Omega - \text{фактор устойчивости};$$

$$k_{0\mu} = \frac{\left| \frac{\partial M_c}{\partial L} \right|_{L_0} L_N}{F_d \Omega_N} - \text{статический передаточный коэффициент по каналу нагру-}$$

зочного воздействия.

$$\text{В символической форме записи: } (T_{a\mu} p + 1) y_0 = -k_{0\mu} \mu.$$

Если воспользоваться более удобными для расчета величинами:

$$J = \frac{GD^2}{4g}; \quad \Omega_N = \frac{\pi n_N}{30}; \quad M_{K_N} = 716,2 \frac{N_{e_N}}{n_N},$$

где GD^2 – маховой момент двигателя, кг.м²; n_N – номинальное число оборотов двигателя, об/мин; N_{e_N} – номинальная мощность двигателя, л. с.;

то номинальное время разгона будет равно:

$$T_{a\mu_N} = \frac{GD^2}{2,7 \cdot 10^5 N_{e_N}}. \quad (1.5)$$

Формула (1.5) широко используется для современных динамических расчетов систем регулирования скорости дизелей.

Значения GD^2 , так же как n_N и N_{e_N} , приводятся в паспортных данных двигателей. Для ДГ величина GD^2 берётся с учетом ротора генератора.

Широкое внедрение турбонаддува в современном дизелестроении ставит ряд специфических проблем, связанных с проектированием систем регулирования [35, 40, 82, 86].

Крутящий момент дизеля связан с цикловой подачей топлива и эффективным КПД, поэтому $M = f(g_{ц}; \eta_e)$; или $M = k g_{ц} \eta_e$.

Разложение этой функциональной зависимости в ряд Тейлора и последующая линеаризация дают:

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial g_{ц}} \Delta g_{ц} + \frac{\partial M}{\partial \eta_e} \Delta \eta_e.$$

Частные производные, входящие в полученное выражение, в соответствии с формулой (1.4) имеют вид:

$$\frac{\partial M}{\partial g_{ц}} = k \eta_e \quad \text{и} \quad \frac{\partial M}{\partial \eta_e} = k g_{ц},$$

поэтому
$$\Delta M = k \eta_e \Delta g_{ц} + k g_{ц} \Delta \eta_e.$$

Эффективный коэффициент полезного действия определяется произведением индикаторного η_i и механического η_m коэффициентов полезного действия двигателя: $\eta_e = \eta_i \eta_m$.

В общем случае переходный процесс двигателя обуславливается изменением нагрузочного и скоростного режимов его работы. Поэтому, пользуясь принципом суперпозиции, целесообразно выяснить изменение η_e при смене режимов вначале по скоростной статической характеристике, а затем по нагрузочной, с тем, чтобы охватить все поле возможных режимов работы.

Изменение скоростного режима дизеля при постоянном положении органа управления сопровождается незначительным изменением η_e .

При работе дизеля по нагрузочной характеристике ($\alpha = const$) механический КПД при наличии наддува изменяется менее существенно в области нагрузок, близких к номинальной. При средних и малых нагрузках влияние η_m на величину η_e более заметно. Однако во всем диапазоне нагрузочных режимов определяющее

влияние на η_e оказывает индикаторный КПД. Основным фактором, определяющим значение η_i при изменении нагрузки в дизелях с наддувом, является коэффициент избытка воздуха α . Поэтому для всех возможных установившихся режимов работы эффективный КПД дизеля с наддувом определяется двумя основными параметрами: α – коэффициентом избытка воздуха и Ω – угловой скоростью коленчатого вала. В соответствии с этим для эффективного КПД определяющей является зависимость:

$$\eta_e = f(\alpha; \Omega). \quad (1.6)$$

Разложение функции (1.6) в ряд Тейлора и последующая линеаризация дают:

$$\Delta \eta_e = \frac{\partial \eta_e}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial \eta_e}{\partial \Omega} \Delta \Omega. \quad (1.7)$$

Производные, входящие в это выражение, должны определяться по точке статической характеристики, соответствующей выбранному равновесному режиму. Как известно,

$$\alpha = \frac{G_{\text{вц}}}{l_0 g_w},$$

где l_0 – количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг топлива; $G_{\text{вц}}$ – цикловая подача воздуха, определяемая выражением:

$$G_{\text{вц}} = V_h \rho_k \eta_v,$$

здесь V_h – рабочий объем цилиндра двигателя; ρ_k – плотность воздуха перед впускными клапанами; η_v – коэффициент наполнения цилиндра. Следовательно

$$\alpha = \frac{V_h \eta_v \rho_k}{l_0 g_w}. \quad (1.8)$$

Параметры V_h и l_0 являются постоянными для всех режимов работы двигателей, поэтому $\alpha = f(\rho_k; g_w; \eta_v)$.

После разложения полученной зависимости в ряд и последующей линейризации с учетом формулы (1.8) можно получить:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha}{\rho_k} \Delta\rho_k - \frac{\alpha}{g_w} \Delta g_w + \frac{\alpha}{\eta_v} \Delta\eta_v. \quad (1.9)$$

Сжатие воздуха в компрессоре может быть принято политропным с постоянным значением показателя политропы n_k . В этом случае уравнение политропы $\frac{\rho_k}{p_k^{n_k}} = const$, позволяет установить, что

$$\Delta\rho_k = \frac{\rho_k}{n_k p_k} \Delta p_k. \quad (1.10)$$

Коэффициент наполнения в основном зависит от угловой скорости Ω коленчатого вала и давления наддува p_k , поэтому $\eta = f(\Omega, p_k)$.

После разложения полученной функциональной зависимости в ряд и последующей линейризации:

$$\Delta\eta_v = \frac{\partial\eta_v}{\partial\Omega} \Delta\Omega + \frac{\partial\eta_v}{\partial p_k} \Delta p_k. \quad (1.11)$$

Подстановка соотношений (1.6–1.11) в выражение (1.9) приводит последнее к виду:

$$\Delta\eta_e = \frac{\partial\eta_e}{\partial\alpha} \left(\frac{\alpha}{n_k p_k} + \frac{\alpha}{\eta_v} \frac{\partial\eta_v}{\partial p_k} \right) - \frac{\alpha}{g_u} \frac{\partial\eta_e}{\partial\alpha} \Delta g_u + \left(\frac{\alpha}{\eta_v} \frac{\partial\eta_e}{\partial\alpha} \frac{\partial\eta_v}{\partial\Omega} + \frac{\partial\eta_e}{\partial\Omega} \right) \Delta\Omega. \quad (1.12)$$

Функциональные зависимости (1.9) и (1.12) показывают, что крутящий момент дизеля с наддувом определяется тремя основными параметрами: цикловой подачей топлива g_u , давлением наддува p_k и угловой скоростью коленчатого вала Ω , т. е. $M=f(g_u, \Omega, p_k)$.

После разложения этой функциональной зависимости в ряд и последующей линеаризации:

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial g_u} \Delta g_u + \frac{\partial M}{\partial p_k} \Delta p_k + \frac{\Delta M}{\partial \Omega} \Delta \Omega. \quad (1.13)$$

Производные, входящие в это разложение, в соответствии с формулами (1.9) и (1.13) определяются выражениями:

$$\frac{\partial M}{\partial g_u} = k \left(\eta_e - \alpha \frac{\partial\eta_e}{\partial\alpha} \right); \quad \frac{\partial M}{\partial p_k} = k g_u \alpha \left(\frac{1}{n_k p_k} + \frac{1}{\eta_v} \frac{\partial\eta_v}{\partial p_k} \right) \frac{\partial\eta_e}{\partial p_k}; \quad \frac{\partial M}{\partial \Omega} = k g_u \left(\frac{\partial\eta_e}{\partial\Omega} + \frac{\alpha}{\eta_v} \frac{\partial\eta_v}{\partial\alpha} \frac{\partial\eta_e}{\partial\Omega} \right). \quad (1.14)$$

Следует при этом подчеркнуть, что производная $\frac{\partial M}{\partial \Omega}$ в выражениях (1.13) и (1.14) учитывает изменение крутящего момента при изменении скоростного режима только за счет изменения эффективного КПД и коэффициента наполнения при неизменной цикловой подаче топлива. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, производная $\frac{\partial M}{\partial \Omega}$ далее дополняется индексами η_e ;

$$\eta_v: \quad \left(\frac{\partial M}{\partial \Omega} \right)_{\eta_e \eta_v} = k g_u \left(\frac{\partial\eta_e}{\partial\Omega} + \frac{\alpha}{\eta_v} \frac{\partial\eta_e}{\partial\alpha} \frac{\partial\eta_v}{\partial\Omega} \right).$$

Таким образом, определены приращения момента сопротивления (1.12) и крутящего момента двигателя (1.13). Подставляя их в исходное уравнение (1.10), последнее можно представить в виде:

$$j \frac{d\Delta\Omega}{dt} + \left[\frac{\partial M_c}{\partial \Omega} - \left(\frac{\partial M}{\partial \Omega} \right)_{\eta, \eta_c} \right] \Delta\Omega = \frac{\partial M}{\partial g_{\text{ц}}} \Delta g_{\text{ц}} + \frac{\partial M}{\partial p_k} \Delta p_k - \frac{\partial M_c}{\partial N} . \quad (1.15)$$

Оценка динамических свойств двигателя оказывается наиболее удобной, если в уравнение (1.15) вместо абсолютных значений координат ввести их относительные безразмерные значения. Для осуществления такой замены следует выбрать базовые значения соответствующих параметров [58, 61, 64, 75, 146].

Если базовыми принять значения координат на выбранном равновесном режиме, то в соответствии с этим относительные координаты, определяемые уравнением (1.10), получают вид:

$$\varphi = \Delta\Omega / \Omega_0 ; \quad q = \Delta g_{\text{ц}} / g_{\text{ц}0} ; \quad \rho = \Delta p_k / p_{k0} ; \quad \alpha_d = \Delta N / N_0 , \quad (1.16)$$

где φ – безразмерное изменение угловой скорости коленчатого вала; q – безразмерное изменение цикловой подачи топлива; ρ – безразмерное изменение давления наддува; α_d – безразмерное изменение настройки потребителя (изменение нагрузки двигателя). Если ввести безразмерные координаты (1.16) в уравнение (1.15), то последнее после деления всех членов уравнения на коэффициент при q получит вид: $T \frac{d\Omega}{dt} + k\varphi = q + \theta_1 \rho - \theta_2 \alpha_d$.

Коэффициент T данного уравнения, имеющий размерность времени, называют постоянной времени собственно дизеля:

$$T = \frac{j \omega_0}{\frac{\partial M}{\partial g_{\text{ц}}} g_{\text{ц}0}} ,$$

безразмерный коэффициент k называют коэффициентом самовыравнивания двигателя:

$$k = \frac{F \omega_0}{\frac{\partial M}{\partial g_{\text{ц}}} g_{\text{ц}0}},$$

где $F = \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} - \left(\frac{\partial M}{\partial \Omega} \right)_{\eta_c; \eta_v}$ – фактор устойчивости собственно дизеля.

Коэффициенты θ_1 и θ_2 также безразмерны:

$$\theta_1 = \frac{\frac{\partial M}{\partial p_k} p_{k0}}{\frac{\partial M}{\partial g_{\text{ц}}} g_{\text{ц}0}}; \quad \theta_2 = \frac{\frac{\partial M_c}{\partial N} N_0}{\frac{\partial M}{\partial g_{\text{ц}}} g_{\text{ц}0}},$$

их называют коэффициентами усиления по давлению наддува θ_1 и настройке потребителя θ_2 .

Таким образом, на основе анализа литературных источников динамические свойства собственно дизеля с наддувом характеризуются неоднородным линейным дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами.

1.2.3 Общая характеристика ГДГА

Преимущества электростанций с использованием ГД [38, 63, 103, 105]:

- низкая стоимость установленной мощности за 1 кВт;
- низкая себестоимость электроэнергии;
- безопасность: отсутствие высоких температур, давлений, моментов инерции;
- большой ресурс 200 ÷ 300 тысяч часов;

- экологическая приемлемость;
- мобильность;
- широкий диапазон рабочих режимов – от 15 ÷ 20 % до 110 % процентов номинальной мощности при пропорциональном расходе топлива.

По сравнению с дизельной электростанцией, газодизельная обеспечивает меньшие затраты на топливо, более длительную непрерывную работу со стандартным топливным баком, возможность эффективного использования газа с различным химическим составом, в том числе попутного.

Недостатком ГД является ограниченная мощность для одной машины. При необходимости могут быть установлены несколько параллельно работающих агрегатов. Одним из основных требований к ГДГА является обеспечение стабильной частоты вращения, поскольку такие агрегаты находят широкий спрос и эксплуатируются как в одиночной работе, так и параллельно [104, 114, 116, 120].

1.3 Методы и устройства распределения нагрузок параллельно работающих ГА

Опыт испытаний и эксплуатации электроэнергетических систем показывает, что при параллельной работе ГА в отдельных режимах в большей или меньшей степени проявляется неустойчивость в виде незатухающих колебаний роторов. При этом обменные колебания мощности между ГА достигают больших амплитуд и в ряде случаев остаются неустранимыми. Параллельная работа ГА в таких режимах запрещалась. Этой проблеме посвящены исследования [22, 125, 128, 135, 136]. Исследования показали большую сложность проблемы и необходимость совершенствования методов, позволяющих вскрыть и проанализировать закономерности и причины колебательной неустойчивости ГА в автономных электроэнергетических системах, разработать способы ее устранения.

Причинами колебаний мощности параллельно работающих машин могут быть [22, 25, 32, 33, 56, 88, 99]:

1. Периодическое изменение вращающего момента первичного двигателя одного или всех параллельно работающих агрегатов. Такое изменение момента происходит из-за неравномерности вращения дизельных двигателей. Оно приводит к периодическому перераспределению активной нагрузки, которые иногда достигают 30 % номинальной и более.

2. Автоколебания в системе регулирования частоты вращения. Эти колебания связаны с наличием люфтов в механических связях регуляторов скорости и могут достигать 15 ÷ 30 % номинальной.

3. Автоколебания в системе регулирования возбуждения. Данные колебания связаны с неустойчивостью системы в малом, вызванной чрезмерной величиной коэффициента усиления и гистерезисом корректора, и ограничены главным образом нелинейностями корректора напряжения. Они могут достигать 50 % номинальной и более.

Между генераторами при отсутствии специальных автоматических устройств распределение активной мощности определяется наклонами характеристик $n(P)$ генераторных агрегатов (рисунок 1.2) и зоной неточности регулирования их частоты вращения 2Δ , обусловленной нечувствительностью регуляторов частоты вращения и нелинейностью указанных характеристик.

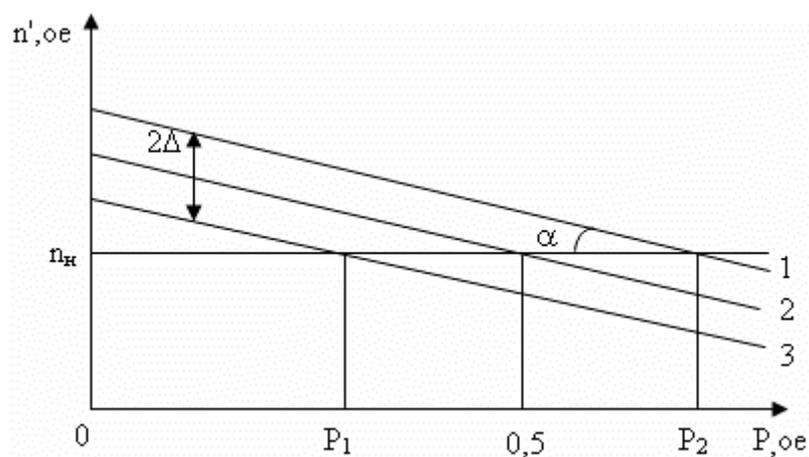


Рисунок 1.2 – Характеристики $n=f(P)$ ГДГА

Кривая 2, проведенная между характеристиками 1 и 3, является основной теоретической характеристикой регулирования частоты вращения ГА. Действительные характеристики ГА располагаются в указанной зоне неточности. При наличии зоны неточности регулирования 2Δ даже при одинаковых характеристиках $n(P)$ параллельно работающих генераторов активные мощности могут распределяться между генераторами в соответствии с их характеристиками 1 и 3. Тогда при заданной зоне неточности регулирования 2Δ , определенном статизме характеристик $tg\alpha = \delta$ и номинальной частоте вращения n_n мощность первого генератора P_1 , определится по характеристике 1, а мощность второго генератора P_2 – по характеристике 3. Абсолютная неравномерность распределения активной мощности равна $P_1 - P_2$.

Степень неравномерности (%) распределения активной мощности:

$$\nu_p = \left[\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right] \cdot 100 \quad (1.17)$$

При одинаковой мощности генераторов ν_p , иногда определяют по формуле:

$$\nu_p = \left[\frac{(P_1 - P_2) / 2P_M}{2P_M} \right] \cdot 100.$$

В этом случае при различной суммарной нагрузке значение ν_p получается заниженным при малых нагрузках системы и завышенной – при больших нагрузках системы.

При заданной зоне неточности регулирования ν_p зависит от статизма δ характеристик $n(P)$, при меньшем статизме значение ν_p увеличивается.

Из рисунка (1.2) следует, что

$$P_1 - P_2 = \frac{2\Delta}{tg\alpha} = \frac{2\Delta}{\delta} \quad (1.18)$$

Подставив выражение (1.18) в (1.17), получим:

$$v_p = \left[\frac{2\Delta}{\delta(P_1 + P_2)} \right] \cdot 100 . \quad (1.19)$$

Из формулы (1.19) следует, что степень неравномерности распределения активной мощности резко возрастает при заданных 2Δ и δ по мере уменьшения нагрузки системы $P_1 + P_2$, а при заданных 2Δ и $P_1 + P_2$ – по мере уменьшения δ .

Радикальным средством для уменьшения v_p является установка специального автоматического устройства распределения активной мощности между генераторами.

За последние годы в СЭС нашли широкое применение устройства, работающие по принципу релейного регулирования и распределения нагрузки между ДГ. Эти устройства отличаются простой конструкции и обслуживания, высоким быстродействием. Выполнены они, в основном, на полупроводниковых элементах [19, 55, 100].

Для формирования управляющих сигналов на объект с помощью этих устройств выявляется генератор с наибольшим активным токами нагрузки. Однако и эти устройства имеют недостатки, связанные, прежде всего, с тем, что для выявления генераторов с наибольшим активным токами используются датчики активной и реактивной составляющих токов, имеющие достаточно сложную конструкцию, невысокую точность [57, 58, 62, 113, 115].

Повысить точности и быстродействие систем автоматического управления АЭС, уменьшить их стоимость и массогабаритные показатели, упростить конструкцию позволяет применение средств вычислительной техники, таких как микроконтроллеры и микро-ЭВМ, а также современные средства съема информации.

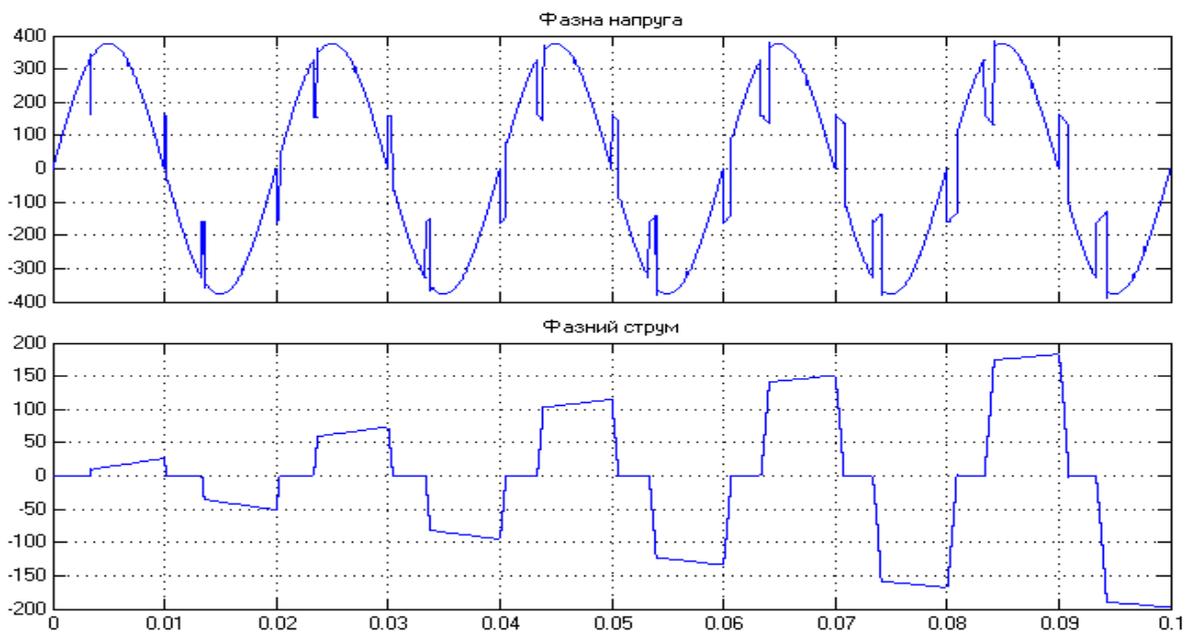


Рисунок 1.3 – Результат моделювання в середі MATLAB режиму пуску двигача постійного тока, живлячогося от генератора соизмеримой мощности через управляемый выпрямитель на пароме Ейск

Для многих автономных электростанций даже современные средства съема информации не позволяют решать эту проблему, поскольку наличие полупроводниковых преобразователей, иногда соизмеримой мощности, приводят к значительным искажениям сетевых напряжений, не позволяющих выделить с достаточной степенью точности активную составляющую тока или мощности. На рисунке 1.3 приведен пример результата моделирования в MATLAB режиме пуска двига-

теля постоянного тока, питающегося от генератора соизмеримой мощности через управляемый выпрямитель.

1.4 Выводы по разделу 1

1. Выпускаемые промышленностью ГД ориентированы на использование смешанного топлива. При работе на одном газе технические характеристики этих машин не удовлетворяют многих заказчиков, что снижает их области применения.

2. Динамические модели дизелей с турбонаддувом, несмотря на изобилие работ в этом направлении, недостаточно обоснованы и не доведены до структурных схем, которые могут быть использованы на практике. Практически отсутствует глубокое физическое обоснование роли и места турбоагнетателя в общей структуре дизеля, что затрудняет эффективное использование современных микропроцессорных систем управления.

3. Используемые многими авторами методы исследования такой сложной системы, как управляемая автономная электроэнергетическая система не позволяют глубоко и качественно решать комплекс возникающих задач, поэтому целесообразно развивать современные методы моделирования и управления, в частности, MATLAB, и аппаратно-программные средства микропроцессорного управления.

РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГДГА ПАРОМА

2.1 Методы изучения динамических свойств

Для детального изучения динамических свойств среди международных нормативных документов на испытание ДВС наиболее широко применяются Правила ЕЭК ООН (ЭССЕ) Директивы ЕС, стандарты Международной организации по стандартизации (ISO) и некоторые другие [44, 59, 129].

Согласно указанным стандартам должны выполняться ряд общих условий, которые заложены в алгоритм программы испытаний.

Пусковой режим, в соответствии с отмеченными условиями, для определения параметров ГД не подходит, так как в этом режиме не установились тепловые процессы и не вступают в действие регуляторы дизеля. Но в то же время, пусковой режим может использоваться для уточнения инерционных масс (момента инерции). Для этой цели используют как метод одиночной, так и метод двойной разгонки [88, 107, 139, 149].

Метод одиночной разгонки. Выполняется разгон двигателя вместе с потребителем (генератором) при отключении генератора от нагрузки в заданном диапазоне изменения частоты вала Δn , или его угловой скорости $\Delta\Omega$. По известному вращательному моменту, в качестве которого выбирается средний M_{exp} или номинальный $M_{ен.м}$, и экспериментально определенным временем пуска (время разгонки) $T_{пр}$, определяется момент инерции ДГ исходя из соотношений [33, 75, 85]:

$$J_{exp} = \frac{T_{пр} M_{exp}}{\Delta\Omega}; \quad J_{ен.м} = \frac{T_{пр} M_{ен.м}}{\Delta\Omega}.$$

Номинальный вращательный момент дизеля равняется:

$$M_{ен.м} = \frac{P_{ен.м} \cdot 9550}{n_{ном}}. \quad (2.1)$$

Средний эффективный вращательный момент двигателя за время разгонка:

$$M_{еср} \cong 0.95 M_{ен.м}.$$

Чтобы выровнять значение $M_{ен.м}$ и $M_{еср}$ в исследуемом интервале, начальные обороты выбираются из величины, которая составляет как минимум (15-20) % от номинальных. Величина $\Delta\Omega$ находится из выражения:

$$\Delta\Omega = \frac{\pi(n_{ном} - n_{нач})}{30}.$$

Приведенные формулы используются для уточнения расчетного значения момента инерции двигателя J_d и генератора J_r .

Момент инерции двигателя связан с моментом инерции маховика приближенным соотношением:

$$I_o \approx (1.2 \div 1.3)I_m; \quad J_m = \frac{mD_m^2}{2}; \quad J_r = \frac{mD_r^2}{4}.$$

Исходя из приведенных формул, разработан алгоритм проведения пусковых испытаний газодизельного генераторного агрегата.

В большинстве случаев, момент инерции генератора дается заводом производителем. В этом случае имеется дополнительная, известная присоединенная к дизелю масса, которая и разрешает использовать метод двойной разгонки. Основные формулы, которые используются в этом случае, приведенные ниже:

$$J_{\partial} \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np1}} = M_e; \quad (J_{\partial} + J_z) \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np2}} = M_e.$$

Приравнивая левые части формул, получаем:

$$J_{\partial} \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np1}} = (J_{\partial} + J_z) \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np2}}.$$

Откуда:

$$J_{\partial} = \frac{J_z}{T_{np2}} \cdot \left(\frac{T_{np1} \cdot T_{np2}}{T_{np2} - T_{np1}} \right).$$

Пусковой режим дает возможность идентифицировать динамическую модель газодизельного генераторного агрегата по управляющему воздействию, используя эталонные кривые переходных процессов. Время T_{np} определяется к моменту, когда $\Delta\Omega \leq 0.02 \Omega_{уст}$.

Алгоритм проведения испытаний состоит в последовательном набросе нагрузки на 20 % от номинальной, начиная с 20 % нагрузки генератора. Программой предусмотрено, что динамические режимы сброса – наброса нагрузки допускаются лишь после установления режимных параметров ГД. После установления процесса, когда обороты ГД отличаются от установившегося значения не более чем на 2 %, подготавливается следующий процесс наброса нагрузки. Поскольку обычно переходной процесс полностью заканчивается по истечению интервала времени, равного $10 \cdot T_{MAX}$ (T_{MAX} – максимальная постоянная времени динамической системы), то для рассматриваемой группы дизелей временной интервал задан жестко и равен 1 мин. После последовательности набросов нагрузки программой предусмотрен автоматический переход на испытания по сбросу нагрузки в аналогичных пределах. Таких последовательностей испытаний проводится не менее шести. Программа испытаний решает задачу автоматического формирования файла испытаний. Для этого осциллограф включается за 2 секунды до подачи сигнала наброса – сброса нагрузки, и запись длится 60 секунд [44, 109, 121, 126].

Поскольку в ГДГА газодизель размещен на одном валу с генератором и доступ к импульсному датчику оборотов ограничен, то частота оборотов определялась косвенно, по частоте напряжения синхронного генератора.

Согласно основным положениям методологии испытаний, была разработана тестирующая программа, алгоритм которой представлен в приложении А.

2.2 Идентификация статических характеристик ГДГА парама

2.2.1 Планирование эксперимента

Поскольку изучению дизелей, используемых для самых разнообразных целей, уделяется очень большое внимание как в нашей стране, так и за рубежом, то их экспериментальные исследования достаточно серьезно регламентированы широкой гаммой нормативных документов [31, 107, 146-151]. В то же время, практически все они ориентированы на исследование собственно дизеля, где факторами, отбираемыми для проведения эксперимента выбираются расход топлива, коэффициент избытка воздуха, давление в компрессоре и т.п. Поэтому естественно, что план эксперимента в таких работах кардинально отличается от тех, которые необходимы для исследования ГДГА.

Для определения необходимых параметров и характеристик ГДГА следует проводить пассивные и активные эксперименты [31, 107-119].

Исследования, проведенные рядом авторов [17, 34, 68, 107, 110, 117, 118] показывают, что характер кривых, отражающих связи двигателей внутреннего сгорания с режимными и регулировочными параметрами приближаются к параболическим законам, поэтому для их описания рекомендуются полиномы второго порядка вида:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + \dots + b_{kk} x_k^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + \dots + b_{ij} x_i x_j, \quad (2.2)$$

где x_i, x_j – факторы проводимого эксперимента (нагрузка генератора и ток возбуждения); Y – исследуемые функциональные зависимости (обороты ГДГА, величина напряжения генератора).

Для рассматриваемого случая исследования нагрузочных характеристик ГДГА, то есть зависимостей оборотов на валу Ω (частоты напряжения ω) от величины нагрузки (отдаваемой активной мощности P , момента на валу M) достаточно проведения однофакторного эксперимента. Для этого случая уравнение регрессии (2.2) упрощается:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2.$$

При описании сложных объектов, когда аналитическое выражение функции отклика не известно, или очень сложно, уравнение регрессии представляют полиномом вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{i \neq j}^K b_i x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_i x_i^2, \quad (2.3)$$

где K – число независимых факторов.

Для случая двух независимых переменных уравнение (2.2) упрощается и принимает вид:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (2.4)$$

Коэффициенты полинома можно рассматривать как коэффициенты разложения в ряд Тейлора, то есть они определяют значения частных производных в окрестности точки, в которой производится разложение неизвестной функции.

Полиномиальная модель весьма универсальна и удобна для решения практических задач. Для однофакторной и двухфакторной моделей она легко поддается геометрической интерпретации. Если, например полином не содержит коэффи-

коэффициентов взаимной связи факторов ($b_{ij}=0$), то поверхность отклика представляет плоскость. Двухфакторная модель второго порядка в зависимости от коэффициентов b_{ij} представляет собой одну из поверхностей второго порядка (параболического цилиндра, эллиптического параболоида и т. п.). Абсолютные значения коэффициентов оценивают степень и характер влияния каждого из факторов на функцию Y . Коэффициенты уравнений (2.3) и (2.4) рассчитываются методом наименьших квадратов.

Учитывая, что при параллельной работе ГДГА работают с минимальной нагрузкой, что составляет 20 % от номинальной, для получения достаточной точности эксперимента предварительно можно принять пять равноотстоящих контрольных точек в диапазоне (20 – 100) % номинальной мощности. Для этого случая формулы для определения коэффициентов уравнения регрессии будут иметь вид:

$$b_0 = y_3; \quad b_1 = [(y_4 + y_5) - (y_1 + y_2)]/3; \quad b_{11} = [(y_1 + y_5) - y_3]/2,$$

где $y_1 \dots y_5$ – средние значения y в порядке возрастания значений x (обороты $y = \Omega$ в функции момента $M = x$).

2.2.2 Использование Matlab-Simulink для аппроксимации экспериментальных данных

Качественно и эффективно коэффициенты полинома возможно определить с использованием современных программных средств. В *MatLab-Simulink* предусмотрены детальные процедуры аппроксимации экспериментальных данных полиномиальной функцией с одновременным расчетом возникающих погрешностей. Используемый алгоритм аппроксимации экспериментальных данных и методика расчёта погрешностей описаны в приложении Б настоящей работы.

Аппроксимация кривой выполняется в пакете Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB, в котором реализованы гибридные нейронные сети ANFIS. На сего-

дняшний день предложены различные схемы классификации нейронных сетей и соответствующие алгоритмы их обучения. Одним из самых распространенных алгоритмов обучения является так называемый алгоритм обратного распространения ошибки. При этом термы входных лингвистических переменных описываются стандартными функциями принадлежности, а термы выходной переменной представляются линейной или постоянной функцией принадлежности. С другой стороны, гибридная сеть ANFIS представляет собой систему нечеткого вывода типа Сугено нулевого или первого порядка, в которой каждое из правил нечетких продукций имеет постоянный вес, равный 1.

2.2.3 Автоматизация обработки результатов измерений напряжения для идентификации статических характеристик ГДГА

Для идентификации параметров ГДГА необходимо получить огибающую напряжения статора при переходном процессе, а также кривую изменения частоты напряжения статора (следовательно, и оборотов ГД). Использование аналоговых запоминающих осциллографов вносит значительную погрешность. Кроме того, достаточно трудно автоматизировать процесс обработки данных. При необходимости измерения нескольких сигналов затруднена их одновременная обработка. Использование цифровых осциллографов позволяет решить все проблемы, связанные с получением, обработкой и хранением данных. На рынке различными фирмами предлагается широкий ряд цифровых осциллографов. Частота дискретизации колеблется от нескольких килогерц до сотен мегагерц. Достаточно большой популярностью пользуются осциллографические приставки к компьютеру (как правило, с USB-интерфейсом).

Программа работает с устройством USB-осциллографа и предназначена для мониторинга, сохранения и анализа данных. Программа снабжена простейшими функциями редактирования записанных сигналов (масштабирование, цифровая фильтрация), имеет достаточно простой и удобный интерфейс. Количество аналоговых выходов осциллографа равно 8. При изменении числа используемых каналов пропорционально изменяется и частота дискретизации (максимальная частота

дискретизации при использовании 1 канала составляет 10 кГц). Для синхронизации может использоваться любой из каналов осциллографа. Выходные форматы программы: двоичный файл, JPEG, получение жесткой копии осциллограммы при помощи печати. Для автоматизации обработки данных удобно получить массив чисел, соответствующих значениям измеряемой величины.

Для получения огибающей необходимо определить точки максимума кривой напряжения. Для этого достаточно определить момент начала очередного периода напряжения, а затем поэлементным сравнением двух соседних отсчетов определить, какой из них больше и это значение записать в массив. После этого с помощью интерполирующего фильтра получить массив значений, который соответствует огибающей [89]. Шаг интерполяции вычисляется по следующей формуле:

$$dU = \frac{U_{m1} - U_{m2}}{N}, \quad (2.14)$$

где U_{m1}, U_{m2} – максимальные значения напряжений на двух соседних периодах, N – количество отсчетов АЦП на одном периоде.

Порядок фильтра равен количеству отсчетов между двумя соседними максимумами и может изменяться в зависимости от частоты измеряемого напряжения или частоты дискретизации.

Для получения графика изменения частоты напряжения необходимо подсчитать количество выборок на одном периоде. Поскольку частота, на которой работает аналого-цифровой преобразователь осциллографа, известна, умножая значение периода дискретизации на количество выборок можно получить значение периода измеряемого напряжения (следовательно, и частоту).

Для определения количества выборок на одном периоде, необходимо отслеживать моменты перехода напряжения через ноль. Для этого используется конструкция проверки условия.

На рисунке 2.1 представлены графики измеренного напряжения и сформированной огибающей.

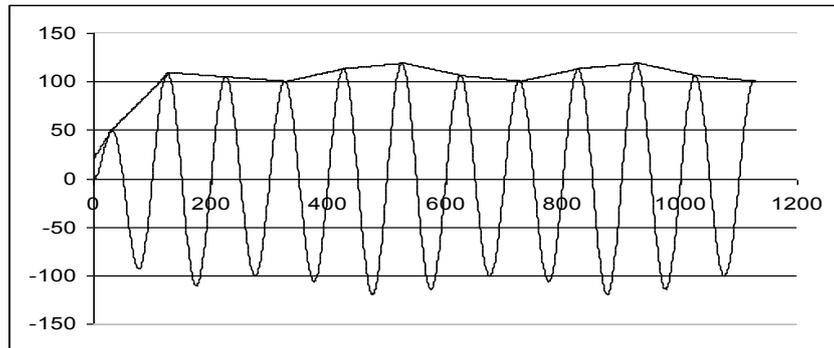


Рисунок 2.1 – График измеренного напряжения его огибающая

На рисунке 2.2 представлены графики изменения частоты с помехой (пунктирная линия), и после применения медианного фильтра (сплошная линия).

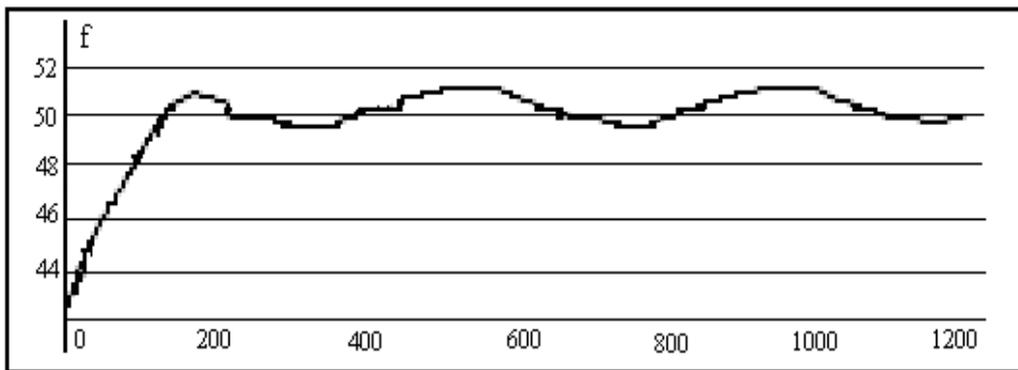


Рисунок 2.2 – Графики изменения частоты с помехой (пунктирная линия), и после применения медианного фильтра (сплошная линия)

2.3 Оценка неравномерности распределения нагрузки между генераторами при параллельной работе

На рис.2.3,*a* приведена характерная для рассмотренных агрегатов осциллограмма (результаты получены с помощью цифровой аппаратуры без последующей обработки) колебаний частоты выходного напряжения ГДГА мощностью 630 кВт во временном интервале 45 сек. при отдаваемой активной мощности 120 кВт.

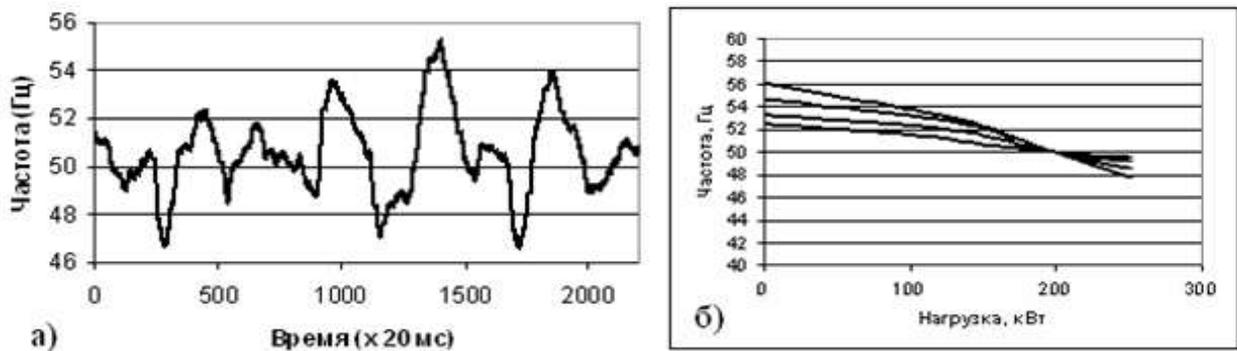


Рисунок 2.3 – Результаты экспериментальных исследований парома Ейск и Лаврентий: а) осциллограмма колебаний частоты выходного напряжения ГДГА; б) обработанные данные для аналогичных ГДГА

Осциллограмма иллюстрирует значительные ($45 \div 55$ Гц) колебания частоты напряжения, а следовательно и оборотов ГД, которые будут приводить к значительным колебаниям активной мощности. Установившейся режим работы двигателя может нарушаться в результате изменения количества энергии на подводе или отводе, когда нарушается равенство эффективного момента и момента сопротивления. При этом факторы, послужившие причинами изменения моментов могут действовать кратковременно (пропуск вспышки в цилиндре) и длительное время. Если после прекращения действия факторов изменения эффективной мощности или мощности сопротивления равенство моментов не выполняется, то уста-

новившейся режим не восстанавливается и двигатель работает неустойчиво. При работе электростанции между генераторами наблюдаются колебания активной мощности. Амплитуда колебаний активной мощности может достигать нескольких десятков процентов от номинальной мощности генератора. Рис.2.3,б иллюстрирует обработанные экспериментальные данные для таких же ГДГА, при работе в диапазоне до 60 % от номинальной мощности.

Распределение активной мощности между генераторами при отсутствии специальных устройств определяется наклонами характеристик $n=f(P)$ агрегатов и неточностью регулирования скорости. Зона неточности регулирования зависит от нечувствительности регуляторов скорости и нелинейности характеристик. Под зоной неточности регулирования понимается зона, лежащая между двумя прямолинейными и параллельными характеристиками 1 и 2, в пределах которой располагаются действительные кривые $n=f(P)$. При наличии зоны неточности регулирования 2Δ даже при одинаковых статических характеристиках $n=f(P)$ параллельно работающих генераторов, активные мощности между генераторами могут распределяться в соответствии с характеристиками 1 и 2 (см. ч.1.3).

Пусть поддерживается частота вращения генераторов $n_N=52Гц$. Максимальная возможная неравномерность распределения активной мощности между генераторами будет в том случае, если одна крайняя характеристика $n=f(P)$ (например 1) относится к первому генератору, а вторая крайняя характеристика (2) – ко второму генератору. Тогда при заданной зоне неточности регулирования 2Δ , определенном $tg\alpha=\delta$ и номинальной частоте вращения n_N , мощность P_1 определится с помощью характеристики 1 а мощность P_2 – по характеристике 2. Абсолютная неравномерность распределения активной мощности равна разности P_1-P_2 [58].

Степень неравномерности распределения активной мощности может быть вычислена для полученных числовых значений по формуле:

$$v_p = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \cdot 100\% . \quad (2.5)$$

Если $P_2 \approx 0$, $\nu_p = 1$, вся нагрузка принята на первый генератор. Если $P_1 \approx 0$, $\nu_p = -1$ вся нагрузка принята на второй генератор, если $P_1 = P_2$, $\nu_p = 0$, нагрузка распределена равномерно.

В литературе в ряде случаев ν_p определяют (при одинаковой мощности генераторов) по формуле:

$$\nu_p = \frac{P_1 - P_2}{2P_N} \cdot 100\% = \frac{165 - 45}{2.500} 100\% = 12\% . \quad (2.6)$$

При таком определении степени неравномерности абсолютная неравномерность относится к неизменной величине $2P_N$. Поэтому при различной суммарной нагрузке степень неравномерности оказывается недооцененной при малых нагрузках системы и переоцененной – при больших нагрузках системы.

Степень неравномерности распределения активной мощности при заданной зоне неточности регулирования 2Δ зависит от статизма характеристики δ , при большем статизме ν_p уменьшается. Статизм характеристики можно определить по формуле:

$$\delta = \operatorname{tg} \alpha = \frac{n_1 - n_2}{P_N} . \quad (2.7)$$

Максимальное и минимальное значение статизма при суммарной нагрузке генераторов до 100 кВт можно определить по формуле (2.6), подставив числовые значения скорости и мощности в относительных единицах:

$$\delta_{\max} = \frac{1,122 - 1,078}{0,2} = 0,22 ; \quad \delta_{\min} = \frac{1,052 - 1,03}{0,2} = 0,11 .$$

Для относительных значений:

$$P_1 - P_2 = \frac{2\Delta}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{и} \quad \nu_p = \frac{2\Delta}{\operatorname{tg} \alpha (P_1 + P_2)} \cdot 100\% . \quad (2.8)$$

Формула (2.8) дает возможность определить ν_p для различных значений зоны неточности регулирования 2Δ , статизма характеристик и загрузки станции. Для приведенных характеристик величина зоны неточности регулирования:

$$2\Delta = \frac{56,1 - 52,7}{50} \cdot 100\% = 6,8\% .$$

Подставив числовые значения в формулу (2.8), можно определить степень неравномерности распределения активной мощности (при загрузке генераторов на половину своей номинальной мощности):

$$\nu_p = \frac{0,068}{0,22 \cdot (0,5 + 0,5)} \cdot 100\% = 30,9\% .$$

Степень неравномерности распределения активной мощности резко возрастает при заданной 2Δ и δ по мере уменьшения нагрузки станции $P_1 + P_2$ и при заданной 2Δ и $P_1 + P_2$ – по мере уменьшения δ .

При одинаковой мощности генераторов такое вычисление не вызывает затруднения и производится с помощью формулы (2.5), причем в данном случае мощности P_1 и P_2 могут быть представлены как в относительных единицах, так и в именованных величинах. Для генераторов разной мощности формула (2.5) справедлива лишь при измерении P_1 и P_2 в относительных единицах каждой из машин. Поэтому вычисление мощностей P_1 и P_2 несколько осложняется, ибо в этом случае при определенном ν_p должна быть вполне определенная мощность $P_p = P_1 + P_2$, которую нельзя вычислить непосредственно с помощью (2.5). Эту формулу, где P_k измеряется в киловаттах лучше представить в виде:

$$v_p = \frac{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} - P_2}{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} + P_2} \cdot 100\% . \quad (2.9)$$

При данных P_{HP} , 2Δ и $tg\alpha$ значения активных мощностей первого и второго генераторов определяются формулами:

$$P_1 = \frac{P_{HP} + \frac{2\Delta}{tg\alpha} \cdot P_{2N}}{P_{1N} + P_{2N}} ; \quad P_2 = \frac{P_{HP} - \frac{2\Delta}{tg\alpha} \cdot P_{1N}}{P_{1N} + P_{2N}} . \quad (2.10)$$

Предполагается, что в выражениях (2.6)–(2.10) абсолютная неравномерность распределения активной мощности относится к переменной величине $P_1 - P_2$. При создании генераторных агрегатов такая трактовка может внести неопределенности. Поэтому абсолютную разность мощностей относят к постоянной величине, как это сделано в (2.6) для агрегатов одинаковой мощности. Для агрегатов неодинаковой мощности v_p определяется выражением:

$$v_p = \left(\frac{P_j}{P_{jN}} - \frac{\sum P_k}{\sum P_{kN}} \right) \cdot 100\% ,$$

где P_j – фактическая нагрузка j -го генератора, кВт, P_{jN} – номинальная мощность j -го генератора, кВт, $j=1,2,\dots,n$.

В частном случае, для установки с двумя генераторами неодинаковой номинальной мощности имеем:

$$v_p = \frac{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} - P_2}{P_{1N} + P_{2N}} \cdot 100\% .$$

Принципиально можно задать распределение нагрузки и не пропорциональное номинальным мощностям агрегатов. Точность распределения активной нагрузки может быть получена в пределах 1–5 % от P_N агрегата наименьшей мощности при поддержании частоты с точностью 0,1–0,5 % от f_N .

Таким образом, при использовании ГДГА необходимо применять электронные регуляторы с микропроцессорными блоками управления. Они имеют такие преимущества, как стабильное дозирование газа независимо от внешних условий, стабильность параметров во времени, возможность коррекции состава газозвоздушной смеси. Программирование регулятора должно проводиться с учетом фактических режимов нагружения, при этом выбирается оптимальный наклон регуляторной характеристики, иначе возможны чрезмерные отклонения по частоте напряжения или неконтролируемые колебательные процессы.

2.4 Исследование автоколебательных процессов частоты напряжения ГДГА

Колебания частоты вращения вала ГД, приводящие к колебаниям частоты генерируемого напряжения, являются определяющими при параллельной работе машин, поскольку приводят к появлению обменных колебаний мощности, величины которых могут достигать недопустимых значений и приводить к развалу электроэнергетических систем. Поэтому как для промышленных, так и автономных электроэнергетических систем введены жесткие стандарты на колебания частоты генерируемого напряжения.

ГДГА совершенно не удовлетворяют требованиям по стабильности частоты. Поэтому для того, чтобы решить проблемы их параллельной работы, необходимо провести детальные исследования колебаний частоты генерируемого напряжения и определить их численные параметры.

Анализ литературных источников показывает, что существует несколько причин, приводящих к появлению низкочастотных колебаний оборотов дизелей. В [47, 58] указывается на возможность появления колебаний оборотов и ухудше-

ние динамических свойств дизеля из-за дискретности съема информации об оборотах вала дизеля. Установлено, что при дискретности съема информации близкой или меньшей интервала между двумя вспышками в цилиндрах могут появляться биения, приводящие к неравномерности вращения. Для рассматриваемого агрегата это явление исключено, поскольку при частоте вращения вала 600 об/мин ГД имеет 6 (ГДВГ-1А-630 и ГДВГ-1А-500) или 8 (ГДВГ-1А-800) цилиндров, что составляет интервал между вспышками соответственно 0.018 сек и 0.012 сек. В то же время датчик оборотов, размещенный по ободу маховика диаметром 1.5 м с интервалом дискретности 2 см. имеет дискретность ≈ 2355 имп./сек, что составляет интервал, меньше 0.5 м.сек.

В [81] одной из причин возникновения автоколебаний в замкнутых САР с ДВС указывается наличие зоны нечувствительности в аппаратуре топливоподачи. В рассматриваемой структуре двигателя такая зона $\varepsilon/2$ имеет место в широтно-импульсном регуляторе управления заслонкой подачи воздуха (газа), которая приводит к снижению контурного коэффициента усиления в формуле:

$$k_{\varepsilon} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{\varepsilon}{2a} + \frac{\varepsilon}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{2a} \right)^2} \right),$$

где a – амплитуда колебаний.

Снижение коэффициента усиления связано с амплитудой автоколебаний. Чем больше амплитуда, тем в большей степени снижается коэффициент усиления и, естественно, если система не имеет достаточного запаса устойчивости, то при наличии регулярных возмущающих воздействий переходные процессы будут сопровождаться слабозатухающими колебаниями с приблизительно стабильной частотой. Это в какой-то мере частично объясняет природу автоколебаний, но реальные автоколебания расположены в сравнительно широком частотном диапазоне.

В [92-97] указывается, что одной из причин низкочастотных колебаний является наличие в системе чистого запаздывания, которое для системы второго по-

рядка способствует их возникновению и поддержанию в определенном частотном диапазоне.

Действительно, если двигатель описывается звеном второго порядка, характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + \exp(-\tau p) = 0.$$

Раскладывая экспоненту в ряд Тейлора и учитывая три члена разложения:

$$\exp(-\tau p) = 1 - \tau p + (\tau p)^2,$$

получим:

$$(T_2^2 + \tau^2) p^2 + (T_1 - \tau) p + 1 = 0,$$

из которого следует, что запаздывание в системе приводит к снижению частоты собственных автоколебаний и увеличению степени колебательности системы.

Однако указанные причины даже при наличии постоянных возмущающих воздействий не в состоянии привести к столь значительным колебаниям, которые имеются в реальном агрегате. Очевидно, что основной причиной столь заметных колебаний оборотов являются неравномерность топливоподачи, поскольку газ подается без какой-либо предварительной подготовки и, возможно, непостоянная теплотворная способность газа. Аналогичные выводы сделаны и в [132]. В [115] авторы указывают еще на одну причину колебаний крутящего момента и оборотов дизеля – это неравномерность угла опережения впрыска топлива, что фактически подтверждает результаты работы [58-71, 132-140].

Проведенный анализ показывает, что существующая гамма дестабилизирующих факторов работы двигателя не позволяет прогнозировать колебания оборотов его вала, а тем более определять их численные значения. Поэтому единствен-

ным реальным способом выполнения таких исследований является экспериментальные.

Методология проведения испытаний этих агрегатов и аппаратно-программные средства позволяют не только автоматизировать этот процесс, но и получить достоверные результаты при различных режимах работы агрегатов.

На рисунке 2.4 (а÷е) приведены фрагменты реализаций процессов, описывающих колебания частоты выходного напряжения газодизель-генераторного агрегата ГДВГ-1А-630 при различных нагрузках (0, 20, 40, 60, 80, 100 % от номинальной), которые получены путем обработки экспериментальных результатов реального выходного напряжения с последующей частичной цифровой фильтрацией шумов квантования, которые имеют место в процессе цифровой обработки.

Эти реализации носят случайный характер, однако получение файлов их реализаций открывает широкие возможности их обработки как классическими методами, так и с помощью специализированных программных средств, таких как Matlab, Matcad и др.

Автокорреляционная функция процесса может быть вычислена в соответствии с формулой [24, 52, 58, 83-89, 129, 134-137]:

$$r_{11}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n)x_1(n+j) , \quad (2.11)$$

где N – количество отсчетов.

На рисунке 2.5, а÷е приведены графики автокорреляционных функций, полученных после обработки экспериментальных данных для каждой из фиксированных нагрузок.

На рисунке 2.6 (а÷е) – соответствующие им спектральные плотности колебаний частоты.

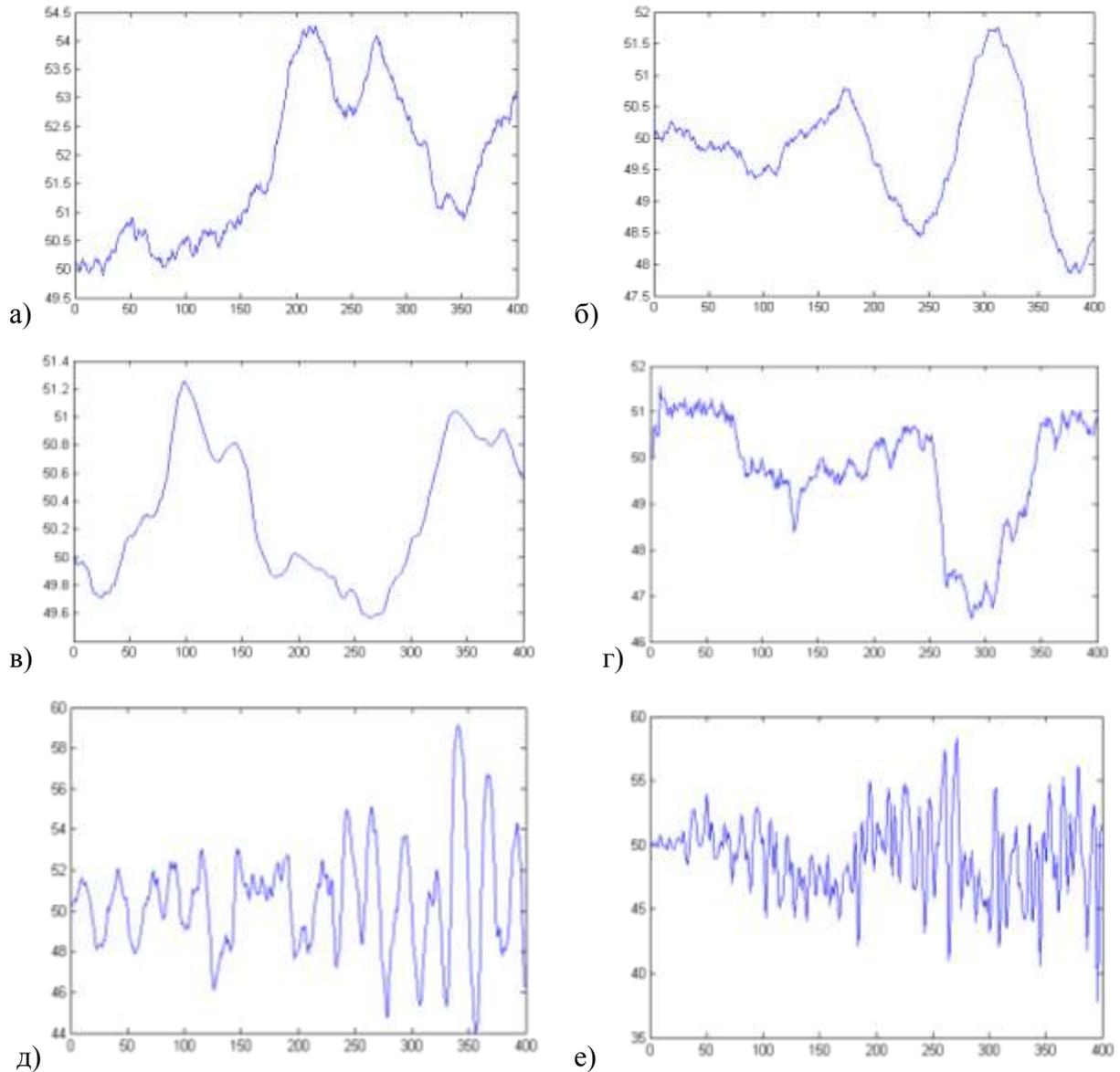


Рисунок 2.4 – Колебания частоты выходного напряжения

Для подтверждения достоверности полученных результатов для одной из реализаций была получена автокорреляционная функция процесса с использованием метода вычислений по формуле 2.11 (сплошная линия), с использованием Matlab (изображение точками), а также с использованием Matscad (изображение пунктирной линией) (рисунок 2.7).

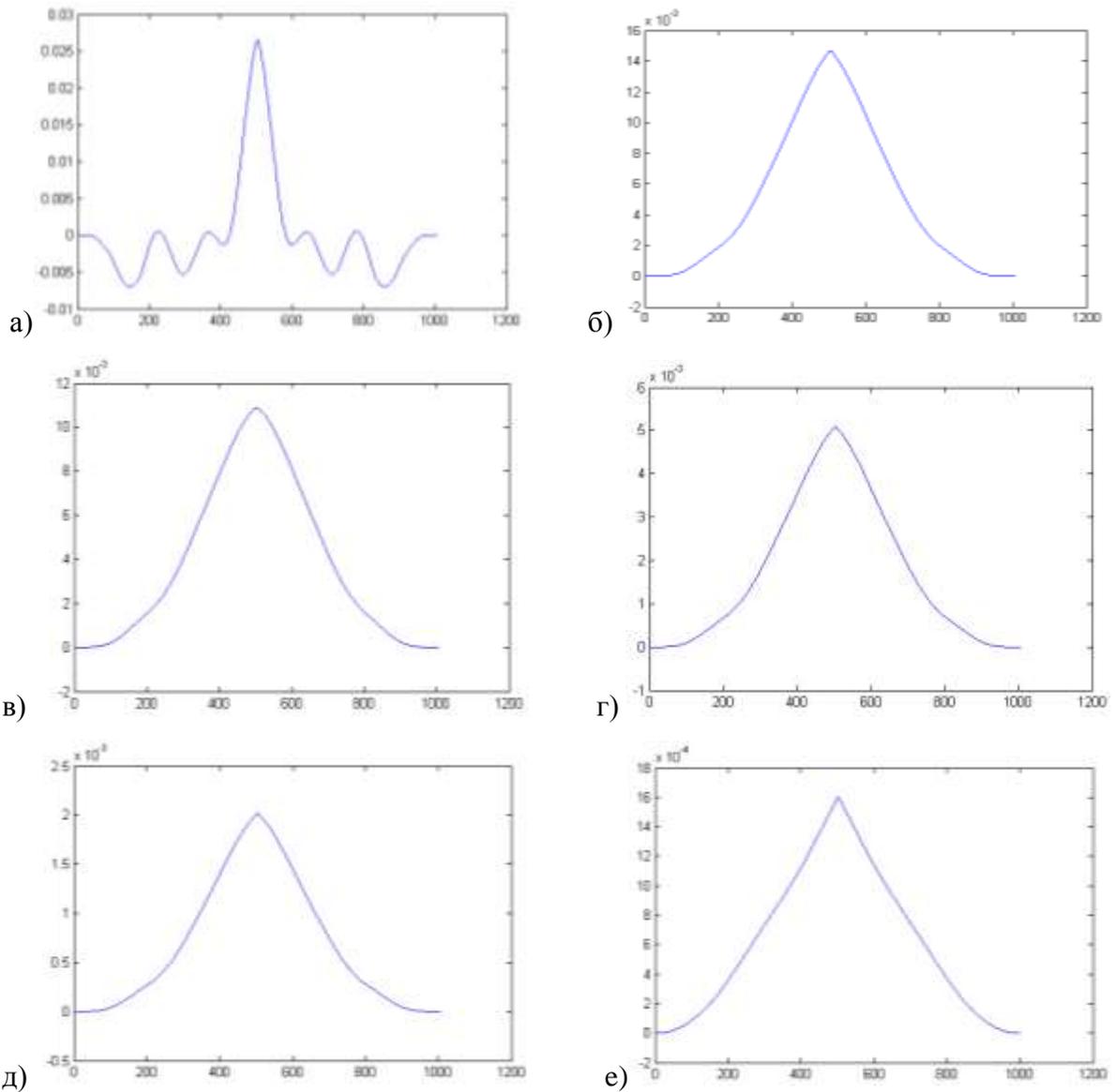


Рисунок 2.5 – Графики автокорреляционных функций

Приведенные результаты показывают высокую их сходимость что подтверждает правомочность использования любого из проверенных средств обработки. Детальный анализ полученных результатов показывает, что в общем случае процесс колебаний частоты является нестационарным с изменяющимся математическим ожиданием и дисперсией. Поэтому обработка экспериментальных данных выполнялась для фиксированных нагрузок, для каждой из которых можно принять случайный процесс стационарным и эргодическим.

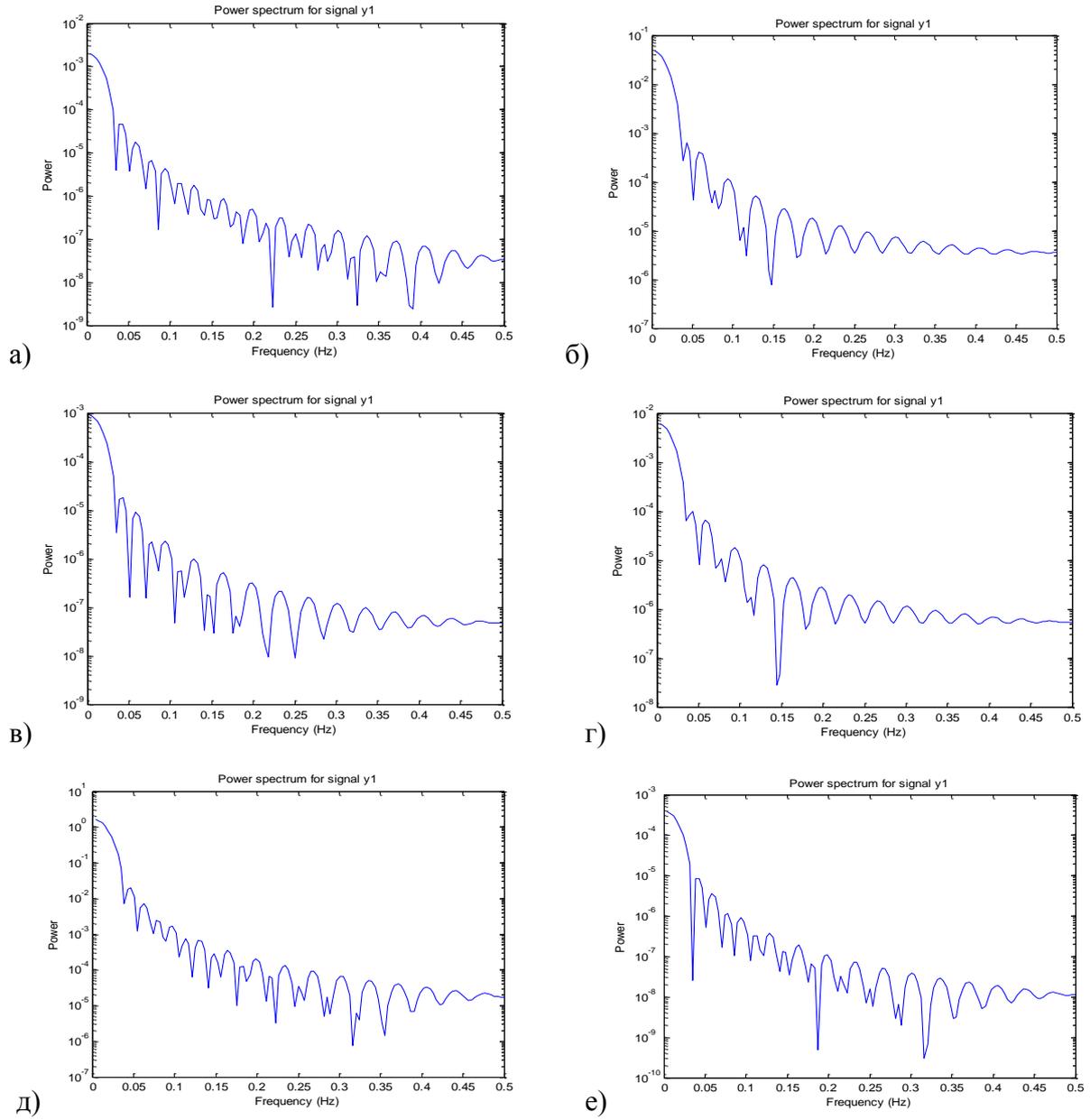


Рисунок 2.6 – Спектральные плотности колебаний частоты

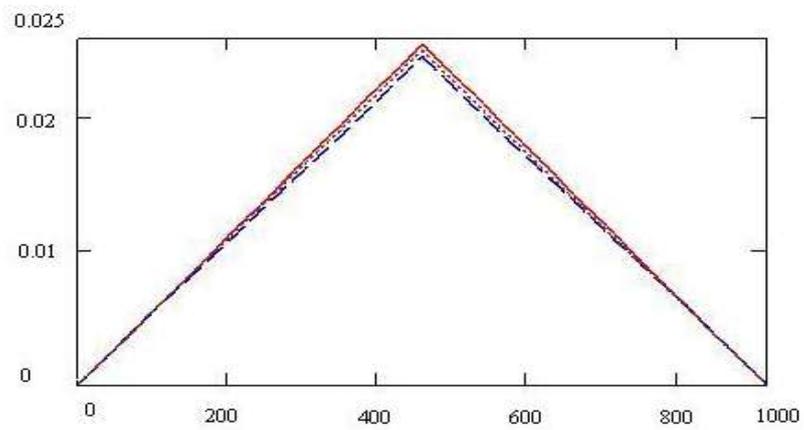


Рисунок 2.7 – Автокорреляционная функция

Вычисление математического ожидания M_ω и среднеквадратического отклонения σ_ω колебаний частоты, выполненные в соответствии с формулами:

$$M_\omega = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n); \quad \sigma_\omega^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - M_\omega]^2.$$

На рисунок 2.8 (а, б) приведены результаты вычисления математического ожидания и среднеквадратического отклонения в зависимости от значений относительной нагрузки P/P_H для 4-х агрегатов, из которых следует, что как один, так и другой параметр имеют тенденцию возрастания со снижением нагрузки на валу ГД. Физически это можно объяснить тем, что ГД является нелинейным элементом, коэффициент усиления которого возрастает со снижением нагрузки.

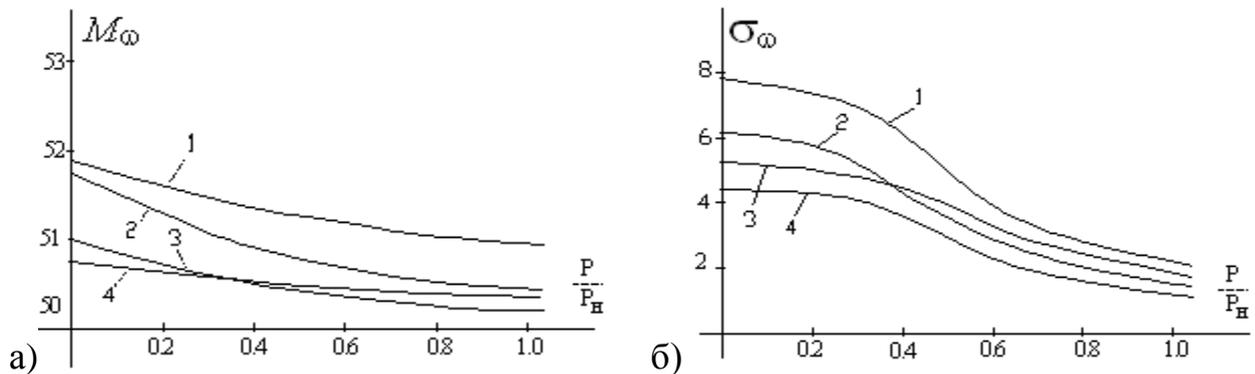


Рисунок 2.8 – Результаты вычислений отклонений скорости вращения роторов 4 экспериментальных ГДГА: а) математическое ожидание; б) среднеквадратическое отклонение

Поскольку параметры регулятора настраиваются на номинальный режим работы с заданными требованиями к динамическим параметрам, возрастание коэффициента усиления способствует возрастанию коэффициента колебательности.

Аппроксимация полученных экспериментальных корреляционных функций типовыми показывает, что для большей части диапазона нагрузок случайный процесс можно описать экспоненциальной корреляционной функцией:

$$r(\tau) = \sigma^2 \exp(-\alpha|\tau|),$$

которой соответствует спектральная плотность:

$$S(\omega) = \sigma^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + \Omega^2}.$$

С достаточно большой постоянной времени α для диапазона нагрузок $P = (0.4 - 1)P_H$; $\alpha \approx 0.3 - 0.4 \text{ сек}^{-1}$. В диапазоне нагрузок $P = (0 - 0.4)P_H$ корреляционная функция с большей достоверностью может быть аппроксимирована выражением вида:

$$r(\tau) = \sigma^2 \exp(-\alpha|\tau|) \cos \Omega \tau,$$

а спектральная плотность:

$$S(\omega) = \sigma^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \Omega)^2}.$$

2.5 Выводы по разделу 2

1. Разработанный комплекс аппаратно-программных средств позволил с минимальными ресурсными затратами получить экспериментальные данные с помощью которых определены статические характеристики ГДГА, вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики колебаний оборотов дизеля, а также разработана его динамическая модель.

2. Исследование Matlab-Simulink позволял эффективно и качественно идентифицировать параметры статической модели ГДГА и оценить её погрешности.

3. В статических режимах ГДГА может быть с высокой точностью представлен простой нейросетевой моделью. Для такого представления удобно использования метода адаптивных систем нейронечеткого вывода.

РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГДГА ПАРОМА И СУДОВ

3.1 Обоснование и выбор типа регулятора и оптимизация его параметров

Параметры динамической модели ГД определяется использованием методов идентификации с последующей подстройкой по адекватности переходных процессов сброса/наброса нагрузки и по управлению.

На рисунке 3.1 приведена динамическая модель ГД реализованная в Matlab-Simulink с установленными параметрами, близкими к физическим для рассматриваемых машин для нагрузки равной 0,8 от номинальной. Из рисунка вытекает, что собственно ГД представляет тремя последовательно соединенными звеньями с достаточно большим коэффициентом усиления. Звено с положительной обратной связью учитывает влияния трубокомпрессора. Коэффициенты передачи трубокомпрессора и дизеля изменяются в зависимости от нагрузки.

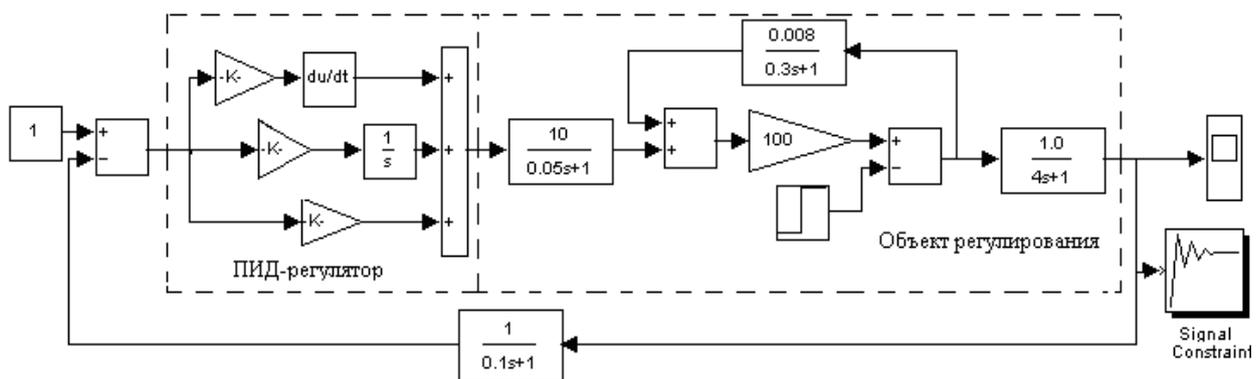


Рисунок 3.1 – Динамическая модель ГД

По отношению к ПИД-регулятору, ГД является объектом регулирования. Динамические свойства объекта регулирования по управляющему и возмущающему воздействию характеризуются кривой переходного процесса (см. раздел 2.6)

и отражают колебательный характер процессов с собственной частотой ω_0 и коэффициентом колебательности m_0 (см. раздел 2.6).

Очевидно, что при наличии возмущающих воздействий на систему параметры ПИД-регулятора необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить степень затухания системы, исключающую в выходном параметре появления колебательных процессов. Для этой цели проанализируем для разных параметров регулятора возможное снижение показателя колебательности системы m_c и его возможные численные значения [143-157].

Оценки возможное снижение m_c по сравнению с m_0 при наличии ПИ-регулятора с передаточной функцией:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = k_p \frac{(T_u p + 1)}{T_u p} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right),$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора T_u – постоянные интегрирования.

Передаточная функция замкнутой системы с ПИ-регулятором при $W_{oc} = 1$:

$$W = \frac{W_{\text{ПИ}}(p) \cdot W_o(p)}{1 + W_{\text{ПИ}}(p) W_o(p)}.$$

Характеристическое уравнение получим $p = m_c \omega \pm j\omega$:

$$1 + W_{\text{ПИ}}(m_c, j\omega) \cdot W_o(m_c, j\omega) = 0.$$

Из полученного комплексного уравнения могут быть получены следующие расчетные формулы:

$$k_p = \frac{1}{A_0} (\omega T_u (m_c^2 + 1) \sin \varphi_0) = \frac{1}{A_0} (m_c \sin \varphi_0 - \cos \varphi_0),$$

из которых с учетом материала, приведенного в [83] находим:

$$m_c = \frac{k_p \cdot A_0 + \cos \varphi_0}{\sin \varphi_0} = \sqrt{\frac{A_0 k_p}{\omega T_u \sin \varphi_0} - 1},$$

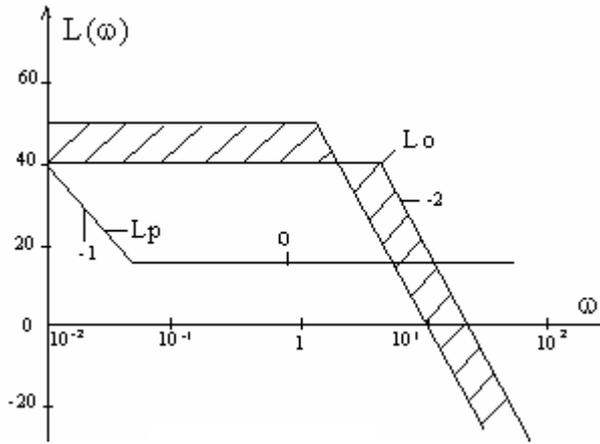


Рисунок 3.2 – ЛАЧХ разомкнутой исследуемой системы

где $A_0 = \sqrt{[\text{Im}_0(m_0 \omega)]^2 + [\text{Re}_0(m_0 \omega)]^2} - \frac{k_0}{(1 - \omega^2 T_0)^2 + (2\xi \omega T_0)^2}$ – амплитудная частотная характеристика объекта; $\varphi_0 = \arctg(\text{Im}_0(m_0 \omega)) / \text{Re}_0(m_0 \omega)$ – его фазочастотная характеристика.

Анализ полученных выражений показывает, что значения показателя колебательности m_c не может быть снижено по сравнению с m_0 . Это также вытекает из анализа ЛАЧХ разомкнутой системы (рисунок 3.2):

$$W_p = W_p W_o = \frac{k_p T_u p + 1}{T_u p} \cdot \frac{k_0}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1},$$

из которой следует, что принципиально невозможно в такой структуре обеспечить желаемую ЛАЧХ с участком -20дб/дек. Следовательно, характер процесса будет определяться только объектом.

Очевидно, что та же картина будет наблюдаться и для пропорционального регулятора с $W_p = k_p$.

Характеристическое уравнение системы в этом случае имеет вид:

$$T_0^2 p^2 + 2.\xi.T_0 p + (k_p k_0 + 1) = 0.$$

Из последней формулы легко устанавливается связь между показателями колебательности системы m_c и объекта m_0 :

$$m_c = m_0 \sqrt{k_0 k_p (1 + m_0^2)} + 1.$$

Таким образом, всегда $m_c < m_0$ колебательные процессы могут лишь усиливаться. При этом частота колебаний:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} \sqrt{1 + k_0 k_p - \xi^2},$$

при $k_0 k_p > 1$ также возрастает.

Рассмотрим теперь возможность снижения степень колебательности системы для случая идеального ПД-регулятора с передаточной функцией:

$$W_{\text{ПД}}(p) = k_p (1 + T_d p),$$

где T_d – постоянная времени дифференциатора.

Характеристическое уравнение для этого случая имеет вид:

$$T_0^2 p^2 + (2.\xi.T_0 + k_0 k_p T_d) p + k_0 k_p + 1 = 0,$$

из которого находим связь между параметрами настройки T_d, k_p и m_c, m_0 :

$$m_c = \frac{\frac{T_d}{2 \cdot \xi \cdot T_0} k_0 k_p + 1}{\left(\frac{m_0^2 + 1}{m_0^2} (k_0 k_p + 1) - \left(\frac{T_d}{2 \cdot \xi \cdot T_0} k_0 k_p + 1 \right)^2 \right)^{1/2}}. \quad (3.1)$$

Из последнего выражения в результате анализа можно видеть, что параметр m_c может возрастать, то есть колебательный процесс в системе будет затухать.

Соотношение между параметрами можно установить из полученного выражения или из построения желаемой ЛАЧХ с учетом изменения параметров ГД (рисунок 3.3).

Из анализа ЛАЧХ следует, что настройку регулятора следует производить не при номинальной мощности ГД, а при минимальной мощности. В этом случае возрастание нагрузки в силу снижения коэффициента усиления будет приводить к возрастанию запаса устойчивости.

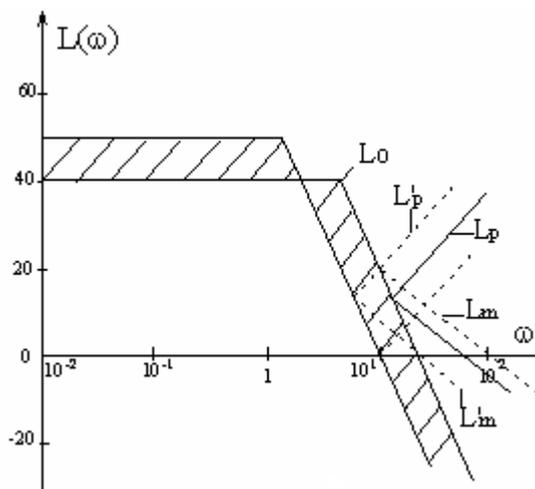


Рисунок 3.3 – Желаемая ЛАЧХ системы

Для обеспечения аperiodического переходного процесса, т.е. когда $m_c = \infty$ из (3.1) находим соотношение: $\frac{m_0^2 + 1}{m_0^2} (k_0 k_p + 1) = \frac{T_d}{2 \cdot \xi \cdot T_0} k_0 k_p + 1$,

которое позволяет найти необходимую связь между параметрами регулятора и объекта.

Таким образом, для обеспечения аperiodического характера передаточного процесса при возмущении по нагрузке ГДГА его регулятор должен содержать дифференцирующую составляющую. Поэтому для общности решения задачи настройки выбираем ПИД-регулятор.

Расчёт оптимальных параметров ПИД-регулятора происходит автоматически формульным методом в зависимости от объекта управления и выбранного критерия оптимальности. При поиске оптимальных параметров пользователю предлагается выбрать один из следующих критериев оптимальности:

- аperiodическое регулирование;
- регулирования с 20% перерегулированием;
- минимизация среднеквадратической ошибки.

Для того чтобы выбрать коэффициенты ПИД-регулятора, можно использовать различные методы теории нелинейных систем или математическое моделирование. С инженерной точки зрения проще второй способ, который позволяет в интерактивном режиме методом проб и ошибок выбрать подходящее значение коэффициентов. В среде *MATLAB* поиск можно автоматизировать с помощью пакета *Signal Constraint*.

Пакет *Signal Constraint* предназначен для настройки параметров нелинейной модели методом численной оптимизации по переходному процессу.

Двойной щелчок по блоку *Signal Constraint* открывает рабочее окно для подбора параметра (рисунок 3.4).

Перетаскивая красные полосы вверх и вниз, можно менять границы допустимой области (она заливается черным цветом). Можно также перетаскивать влево и вправо вертикальные границы. Щелчок ПКМ по красной полосе позволяет задать параметры ограничения более точно в диалоговом окне.

Основными элементами замкнутой системы управления ГД в рисунке:

- объект регулирования;
- ПИД-регулятор;
- цель обратной связи и узел сравнения.

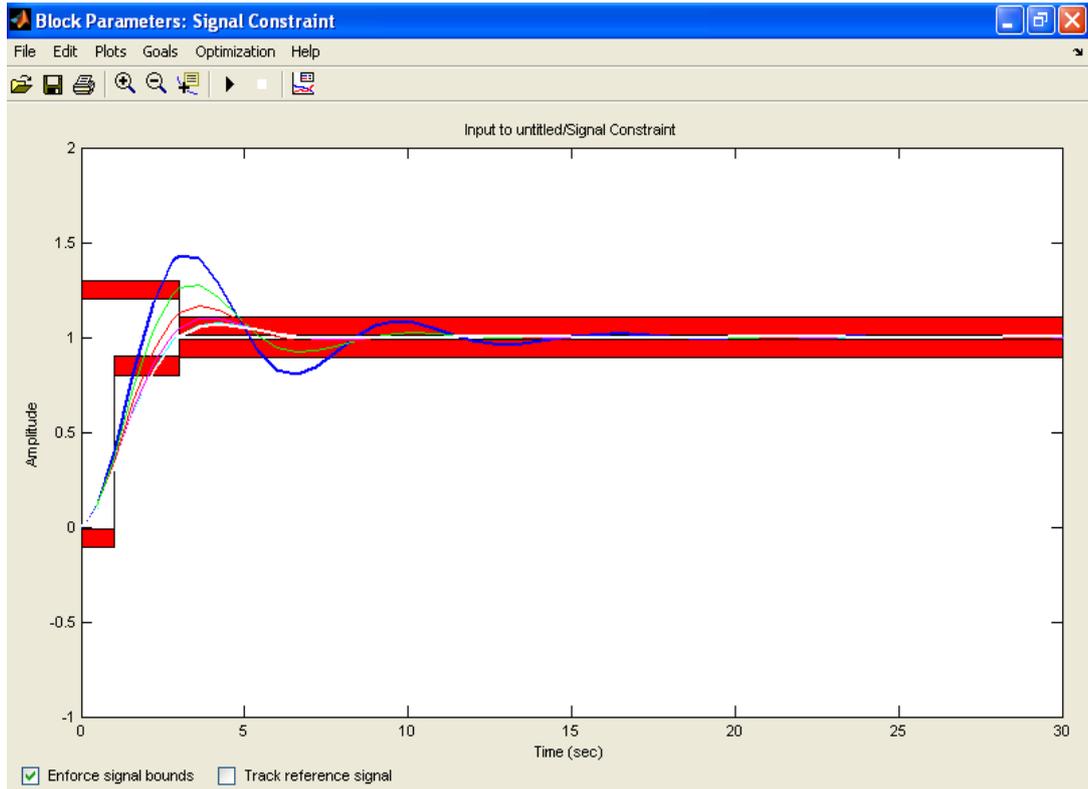


Рисунок 3.4 – Окно подбора параметров

При заданной структуре объекта управления и известных неопределенностях его параметров необходимо найти значения коэффициентов K_p , K_i и K_d регулятора. Значения коэффициентов K_p , K_i и K_d регулятора выбраны в соответствии с методикой Зиглера-Николса, предназначенной для оптимальной настройки ПИД-регуляторов (Ziegler-Nichols method). При начальных значениях настраиваемых параметров для нагрузки $0,8P_n$, и $K_p=1,5 \cdot 10^{-2}$; $K_i=1,3 \cdot 10^{-4}$; $K_d=4,2 \cdot 10^{-3}$. Полученный результат показан на рисунке 3.5. На данном рисунке две кривых соответствуют переходным процессам в системе при начальных значениях и значения коэффициентов $K_p=1,7 \cdot 10^{-2}$; $K_i=1,5 \cdot 10^{-4}$ и $K_d=4,4 \cdot 10^{-3}$ нашли после оптимизации ПИД-регулятора.

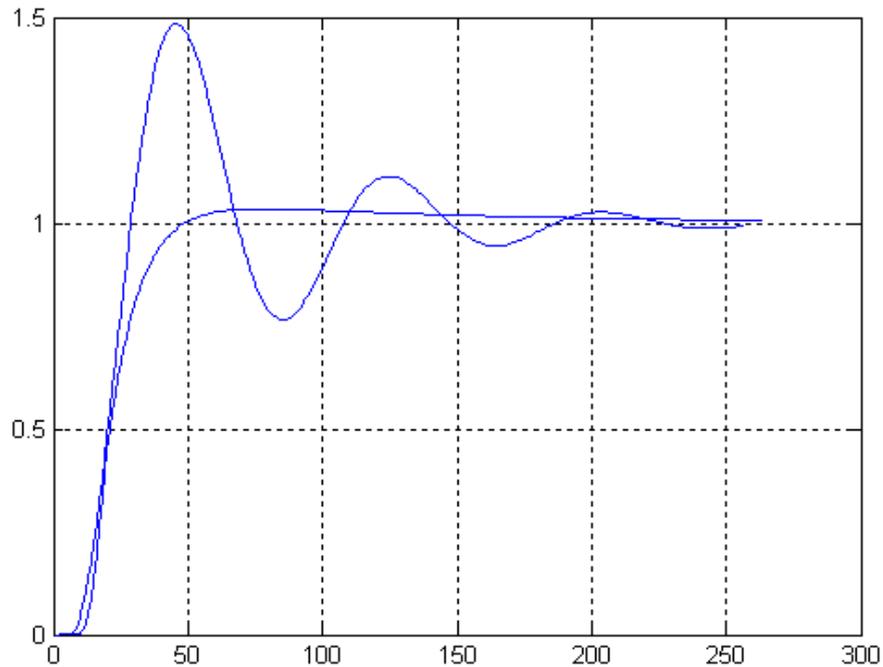


Рисунок 3.5 – Переходные процессы в системе

3.2 Автоматизация настройки параметров регулятора ГДГА

3.2.1 Нелинейная коррекция коэффициентов ПИД-регулятора

Наиболее часто в задачах автоматизации применяется пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование. При ПИД-регулировании сигнал управления зависит от разницы между измеренным параметром и заданным значением, от интеграла, от разности и от скорости изменения параметров. В результате ПИД-регулятор обеспечивает такое состояние исполнительного устройства (промежуточное между включен или выключен), при котором измеренный параметр равен заданному. Поскольку состояние исполнительного устройства стабилизируется, точность поддержания параметра в системе повышается в десятки раз. Таким образом, закон регулирования обеспечивает точность.

Сигнал управления, который вырабатывает регулятор, определяется тем, насколько велико рассогласование (пропорциональная компонента), насколько

долго сохраняется рассогласование (интегральная компонента) и, наконец как быстро изменяется рассогласование (дифференциальная компонента). Постановка задачи оптимизации такова: при заданной структуре объекта управления и известных неопределенностях его параметров найти значения коэффициентов K_p , K_i , K_d регулятора, при которых в представленной замкнутой структуре переходный процесс будет иметь параметры, заданные по умолчанию.

Качество управления, которое обеспечивает ПИД-регулятор, в значительной степени зависит от того, насколько хорошо выбранные параметры регулятора соответствуют свойствам системы. Это означает, что ПИД-регулятор перед началом работы необходимо настроить.

Поскольку ГДГА характеризуются высокой нестабильностью частоты оборотов, которые в свою очередь зависят от нагрузки генератора (момента на валу ГД), то необходимо корректировать коэффициенты регулятора в зависимости от режима работы ГДГА. На основе проведенного эксперимента были получены значения коэффициентов регулятора, которые при заданной мощности обеспечивают наилучший переходный процесс. Значения коэффициентов приводятся в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Оптимальные значения коэффициентов регулятора

P	K_p	K_i	K_d
0	0	0	0
0,2	$0,61 \cdot 10^{-2}$	$0,46 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
0,4	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$0,98 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
0,6	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
0,8	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
1	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 3.6 представлены соответствующие зависимости оптимальных значений коэффициентов ПИД-регулятора от мощности ГДГА [131, 154].

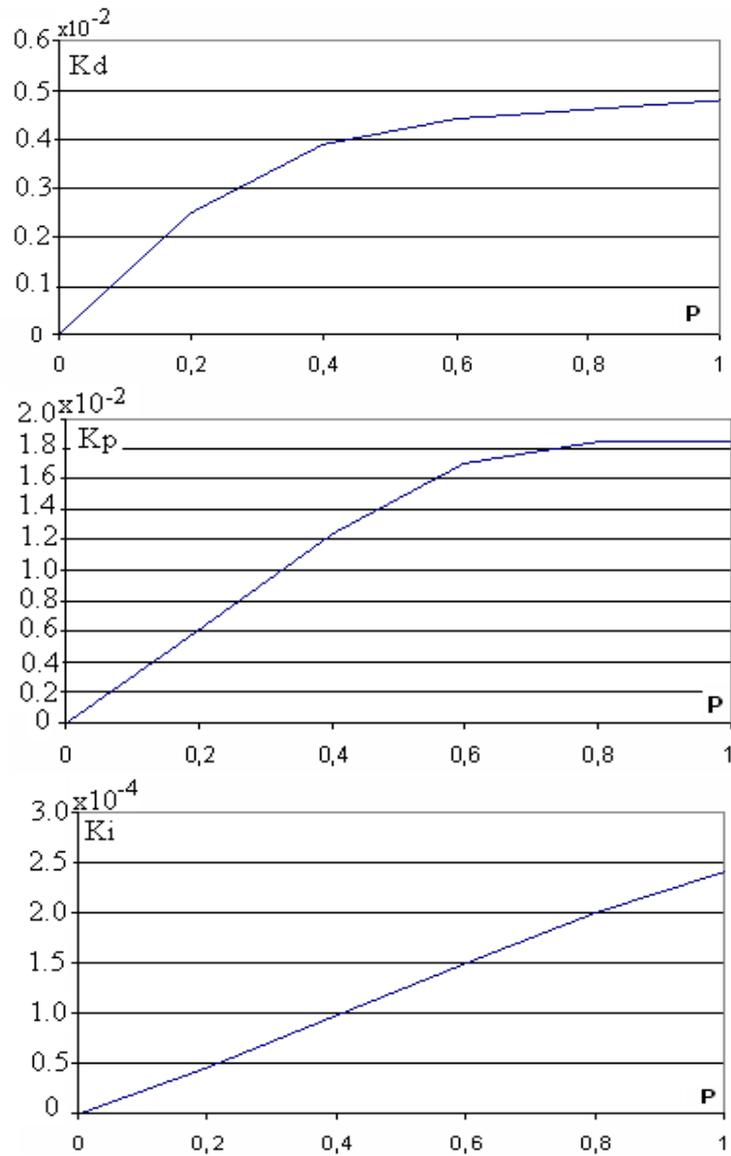


Рисунок 3.6 – Зависимости оптимальных значений коэффициентов регулятора в зависимости от мощности ГДГА

Для этого используется микроконтроллер, в Flash-памяти которого хранятся значения коэффициентов. На языке программирования высокого уровня таблица коэффициентов будет выглядеть как массив, элементами которого являются значения коэффициентов. В качестве индекса, по которому будет выполняться доступ к элементам массива, используется значения текущее нагрузки (мощности) генератора. Сигнал мощности может поступать в микроконтроллер через АЦП с датчика активной мощности, который непосредственно подключен к шинам гене-

ратора, либо другим способом. На рисунке 3.7 представлена блок-схема алгоритма, выполняющего коррекцию коэффициентов ПИД-регулятора.

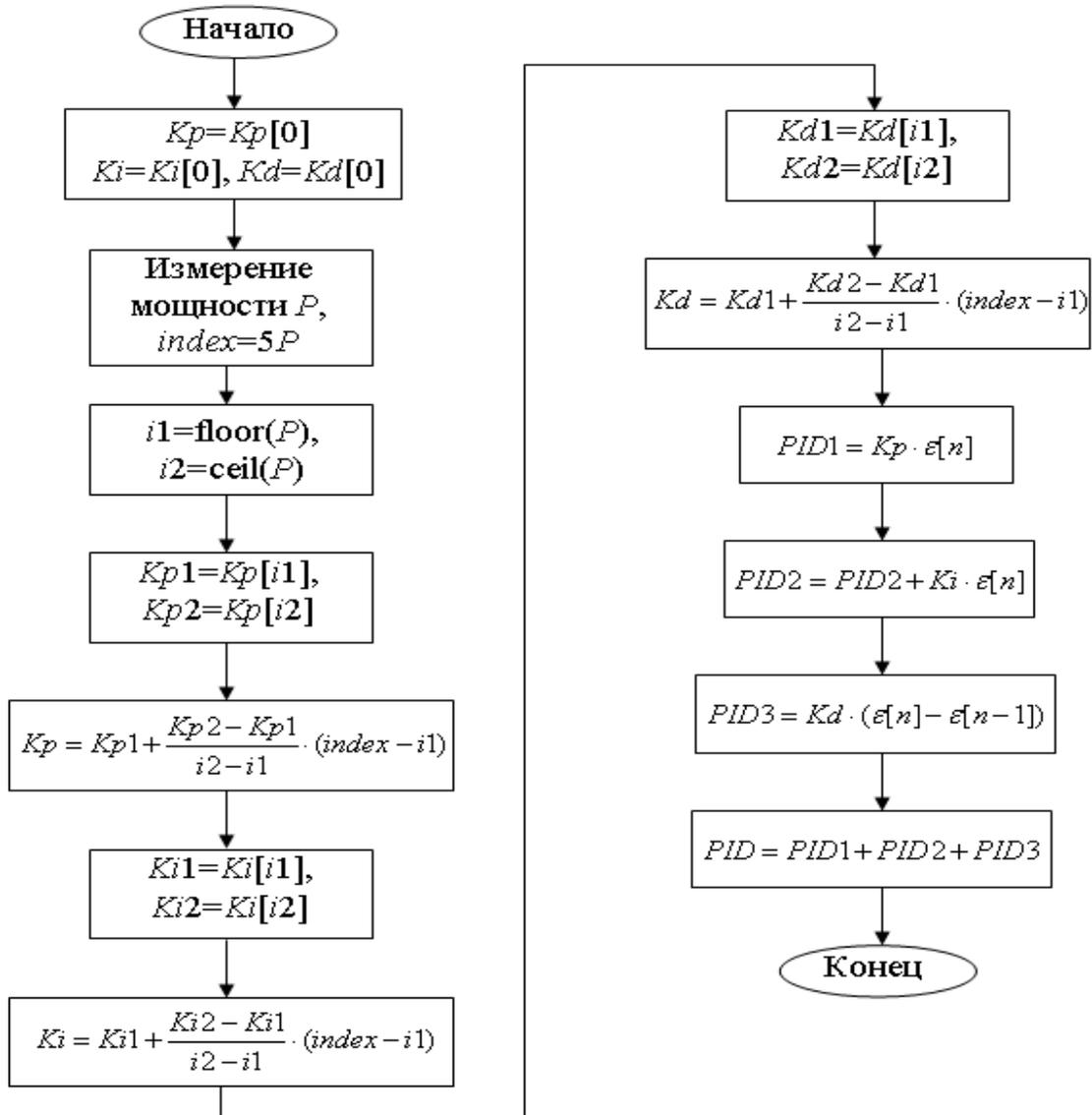


Рисунок 3.7 – Алгоритм корректировки параметров ПИД-регулятора

Работа алгоритма начинается с установки начальных значений коэффициентов K_p , K_i , K_d регулятора. После этого выполняется измерение величины нагрузки, подключенной к генератору. В относительных единицах загруженность ГД может быть выражена следующим образом:

$$P = \frac{P_n}{P_\delta},$$

где P_n – нагрузка генератора; P_o – максимальная мощность ГД. Значение P может изменяться от 0 до 1.

Поскольку индексом массива (*index*) может быть только целое число, то выполняется приведение значения мощности к целому числу путем умножения на заданный коэффициент. В общем случае, в таблице (массиве) может не содержаться элемента, соответствующего текущему значению мощности ГД, поэтому необходимо выполнить интерполяцию. Для этого находят ближайшие значения коэффициентов, соответствующих заданной мощности путем округления индекса вверх и вниз (функции *ceil* и *floor* соответственно). Из памяти микроконтроллера выбираются два коэффициента, соответствующие этим индексам.

Затем по формуле линейной интерполяции:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) ,$$

находится значение соответствующего коэффициента.

Аналогичная процедура выполняется для интегрального и дифференциального коэффициентов. Полученные коэффициенты используются в расчете пропорциональной (*PID1*), интегральной (*PID2*) и дифференциальной (*PID3*) составляющих. Результирующее значение управляющего параметра (*PID*) получается путем суммирования всех составляющих.

Недостаток предложенного подхода заключается в необходимости проведения предварительных испытаний с целью получения значений коэффициентов, которые в дальнейшем используются для коррекции ПИД-регулятора. Кроме того, эти значения уникальны для каждого ГД, следовательно, отсутствует возможность какой-либо автоматизации. Тем не менее, предложенная методика коррекции коэффициентов регулятора достаточно проста.

3.2.2 Адаптивная нелинейная система управления ГДГА

В настоящее время большое внимание уделяется разработке самонастраивающихся систем автоматического регулирования. Это объясняется тем, что в промышленности, в том числе и в энергетике, широко используются системы автоматического регулирования, которые часто настроены не оптимально, что приводит к существенному ухудшению качества электроэнергии, экономическим потерям и в некоторых случаях даже к аварийным ситуациям. При правильной настройке эти алгоритмы обеспечивают достаточно хорошее качество управления для большинства объектов промышленной технологии.

Основной принцип определения коэффициентов ПИД-регулятора состоит в том, чтобы управляемому объекту дать ступеньку управляющего воздействия (подключить или отключить некоторую нагрузку) и посмотреть на реакцию объекта. Иными словами, определить переходную функцию объекта. Далее по переходной функции по эмпирическим формулам определяются коэффициенты регулятора.

Передаточная функция ПИД-регулятора принимается следующей:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

где k_p , T_i , T_d – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования.

Непрерывный закон функционирования ПИД-регулятора описывается выражением:

$$U(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right), \quad (3.2)$$

где e – ошибка регулирования.

Путем замены $t = kT_k$, уравнение (3.2) можно записать в конечных разностях:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) T_K + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_K} \right],$$

где k – номер период квантования; T_k – период квантования.

При достаточно малых периодах квантования цифровой ПИД закон управления обеспечивает почти такое же качество процессов управления, что и исходный непрерывный закон. Разностное уравнение, описывающее работу регулятора, имеет вид:

$$u(k) = u(k-1) + K_p (d_0 e(k) + d_1 e(k-1) + d_2 (k-2)),$$

где обозначено $d_0 = 1 + T_K/T_i + T_d/T_K$; $d_1 = -1 - 2T_d/T_K$; $d_2 = T_d/T_K$.

При ПИД регулировании сигнал управления зависит от разницы между измеренным параметром и заданным значением, от интеграла, от разности и от скорости изменения параметров. В результате, ПИД-регулятор обеспечивает такое состояние исполнительного устройства, при котором измеренный параметр равен заданному. Сигнал управления, который вырабатывает регулятор, определяется тем, насколько велико рассогласование насколько долго сохраняется рассогласование и, как быстро изменяется рассогласование.

Качество управления, которое обеспечивает ПИД-регулятор, в значительной степени зависит от того, насколько хорошо выбранные параметры регулятора соответствуют свойствам системы. Качество регулирования ПИД-регулятора определяется точностью настройки его параметров.

Для оценки качества регулирования при ступенчатом входном воздействии обычно используют интегральные критерии, учитывающие площадь на интервале

времени t_p , ограниченную графиком переходного процесса $y(t)$. К числу наиболее распространенных относится интеграл:

$$I_{л,y(t)} = \int_0^{t_p} y(t) dt ,$$

поскольку он имеет аналитическую связь с настроечными параметрами. Такой интеграл при заданном запасе устойчивости имеет минимальное значение при:

$$K_u = (K_p / T_u)_{\max} .$$

Наиболее удобным показателем оптимальности качества функционирования системы является интеграл от модуля переходного процесса:

$$I_{м,y(t)} = \int_0^{t_p} | y(t) | dt .$$

В этом случае влияние отрицательных значений $y(t)$, имеющих место в колебательных системах, устраняется. При этом поверхность отклика с таким интегралом имеет наиболее предсказуемый характер с точки зрения применения численных поисковых процедур.

При анализе систем управления принято рассматривать два типа входных воздействий: возмущение по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$ и управляющего воздействия по заданию $u(t)$. Для оценки качества используется интеграл:

$$I_{м,\lambda} = \int_0^{t_p} | y(p, \lambda, t) | dt \rightarrow \min ,$$

где p – вектор настраиваемых параметров.

Интегральный критерий может быть записан в виде:

$$I_{m,u} = \int_0^{t_p} |u(t) - y(p,u,t)| dt \rightarrow \min .$$

Использование численного метода оптимизации позволяет добиться компромисса, обеспечивающего минимальное значение суммарного интегрального критерия по модулю при соблюдении ограничения на запас устойчивости. Выражение для суммарного интеграла при единичных ступенчатых воздействиях выглядит следующим образом:

$$I_{m,\Sigma} = aI_{m,\lambda} + I_{m,u'},$$

где a – масштабный коэффициент, приводящий вес интеграла $I_{m,\lambda}$ к весу интеграла $I_{m,u'}$.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости в задачах поиска и оптимизации настроечных параметров методом имитационного моделирования используются прямые показатели, например степень затухания, которая вводится в целевой критерий:

$$f(p, x, t) = I_{m,\Sigma} + b |\psi_{3\delta} - \psi| \rightarrow \min,$$

где b – масштабный коэффициент; $\psi_{3\delta}$ – заданная степень затухания. Такой подход дает возможность произвести оптимальный синтез системы непосредственно с учетом её целевого назначения.

На рисунке 3.8 представлена структурная схема регулятора с самонастройкой. На рисунке 3.8 обозначены Ω_3 – заданная частота вращения; Ω_f – фактическая частота вращения; ε – сигнал ошибки. Основу системы составляет цифровой ПИД-регулятор (Р). На рисунке 3.9 представлена структурная схема цифрового

ПИД-регулятора. Через Z^{-1} обозначен блок задержки сигнала на один период квантования.

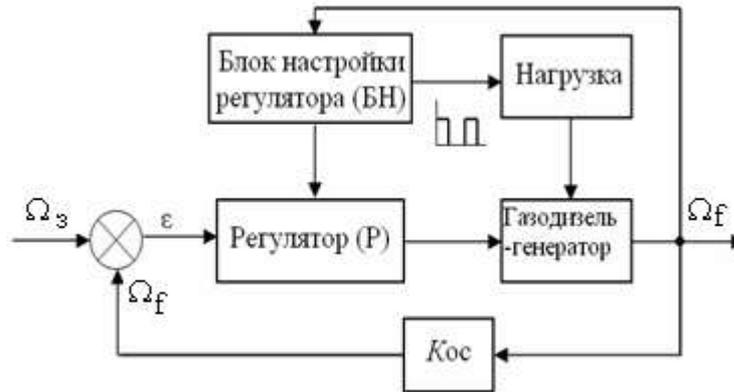


Рисунок 3.8 – Структурная схема регулятора с самонастройкой

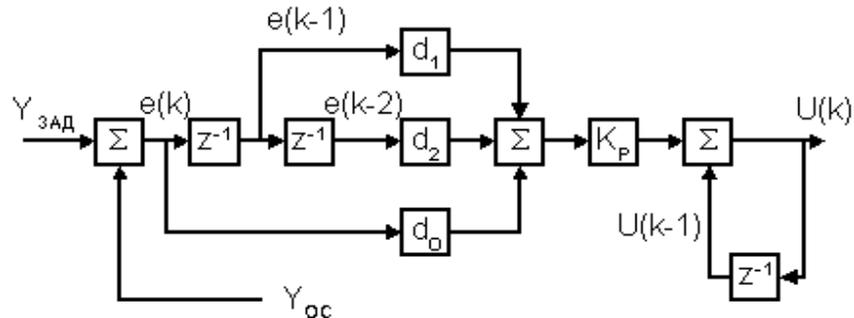


Рисунок 3.9 – Структурная схема цифрового ПИД-регулятора

Регулятор с настройкой работает следующим образом. Оператор задает требования, предъявляемые к настраиваемой системе. Блок настройки регулятора формирует импульсный сигнал, управляющий подключением и отключением нагрузки к ГДГА. Величина нагрузки увеличивается от 0 до 100 % мощности генератора с шагом 20 %. При этом, для точной настройки регулятора (уменьшения влияния ошибки измерений), наброс и отключение нагрузки выполняется для каждой точки заданное количество раз. Идентификация объекта управления осуществляется по экспериментальной переходной характеристике.

Алгоритм реализован программно на базе микроконтроллера STM32F407VG и представлен на рисунке 3.10. Работа алгоритма начинается с инициализации переменных. Установка $P=0$ означает, что коэффициенты регуля-

тора настраиваются для режима холостого хода. Выбирается начальное значение коэффициента пропорциональности и шаг приращения значения этого коэффициента.

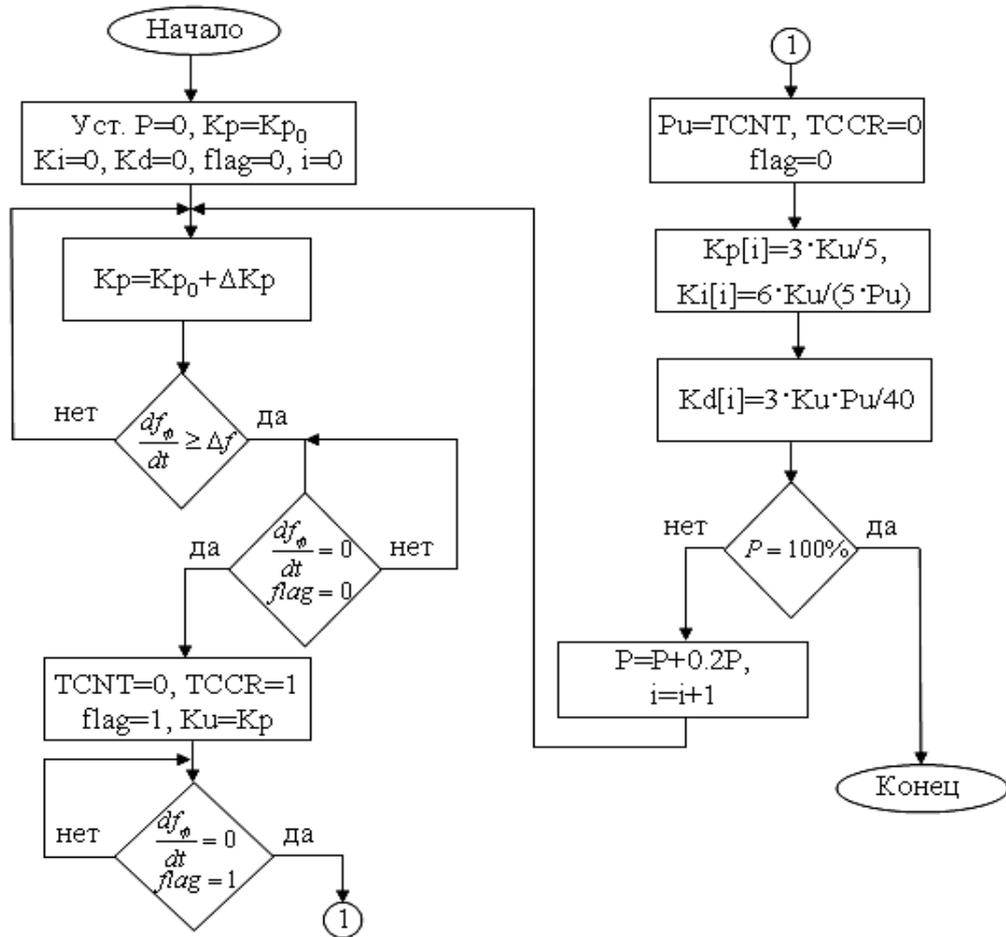


Рисунок 3.10 – Алгоритм реализован программно на базе микроконтроллера

Перед настройкой зоны пропорциональности интегральная и дифференциальная компоненты отключаются, либо постоянная интегрирования устанавливается максимально возможной, а постоянная дифференцирования – минимально возможной. Коэффициенты K_i , K_d устанавливаются равными нулю. Затем выполняется увеличение коэффициента пропорциональности K_p до тех пор, пока система не потеряет устойчивость. Этот режим отслеживается путем вычисления производной регулируемого параметра. Если объект устойчивый, то производная регулируемого параметра равна 0 (или близка к 0). При появлении на выходе колебаний производная $\frac{df_\phi}{dt} \geq \Delta f$ будет отличаться от 0. Предельное значение K_p обо-

значается как K_u , а период автоколебаний как P_u . При наступлении такого режима необходимо измерить период колебаний. Для этого анализируется значение производной, и когда она будет равна нулю, запускается таймер-счетчик, который измеряет период колебаний. Переменная $flag$ используется для отслеживания начала и окончания измерения периода колебаний. В основе работы алгоритма лежит методика настройки ПИД-регуляторов Зиглера-Николса. Задаются следующие значения коэффициентов регулятора:

$$K_p = \frac{3 \cdot K_u}{5}, K_i = \frac{6 \cdot K_u}{5 \cdot P_u}, K_d = \frac{3 \cdot K_u \cdot P_u}{40}.$$

После этого выполняется формирование сигнала на подключение 20 % нагрузки от мощности генератора. Выполняется повторная настройка коэффициентов для заданной мощности. Значения коэффициентов записываются в массив. После того, как выполнена настройка регулятора для 6 точек (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %), алгоритм заканчивает свою работу. Полученные коэффициенты используются при работе ГДГА и корректируются в зависимости от нагрузки, подключенной к генератору. Автоматизация метода состоит в замене настраиваемого регулятора двухпозиционным реле, что приводит к возникновению установившихся автоколебаний в контуре регулирования. При оптимизации настроек регулятора по предложенной методике учитываются реальные характеристики не только объекта регулирования, но и всех других элементов замкнутой системы. Полученный алгоритм может быть реализован на микропроцессорных регуляторах, которые в этом случае переводятся в режим самонастройки как по команде персонала, так и автоматически, по определенному алгоритму (периодически, при изменениях нагрузки или других условий). Цифровые алгоритмы управления являются важнейшей составной частью программного обеспечения микроконтроллеров.

3.3 Выводы по разделу 3

1. Анализ работы АЭЭС позволил установить, что коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок приводят к колебаниям напряжений и частоты сети, спектр которых находится в том же частотном диапазоне, что и спектр колебаний оборотов ГДГА, что способствует возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами.

2. На основе метода ЛАЧХ обоснована необходимость использования дифференциальной составляющей в регуляторе дизеля и установлена аналитическая зависимость между параметрами регулятора и дизеля, позволяющая устанавливать допустимую степень колебательности системы.

3. На основе оптимизации параметров ПИД-регулятора для каждой из нагрузок определены их нелинейные зависимости от величины нагрузки на валу ГДГА.

РАЗДЕЛ 4 РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

4.1 Управление с использованием нечеткого регулятора

ПИД-регулятор достаточно просто настраивается для работы с конкретным объектом и обеспечивает удовлетворительную стабилизацию регулируемого параметра при незначительных его отклонениях от заданной величины. Однако при резких изменениях режима работы управляемого объекта или при переходе его на другой режим работы качество переходного процесса в системе с ПИД-регулятором может оказаться неудовлетворительным. Возникает необходимость в использовании дополнительных устройств, корректирующих работу ПИД-регулятора. В системе управления оборотов ГДГА может использоваться технология нечеткой логики.

Функциональная схема системы автоматического управления на базе нечеткой логики (системы управления с нечетким регулятором (НР)) представлена на рисунке 4.1. Схема состоит из устройства сравнения, нечеткого регулятора, объекта управления ГДГА, и цепи обратной связи.

Нечеткий регулятор включает три основных блока: блок фаззификации, блок формирования логического решения и блок дефаззификации.

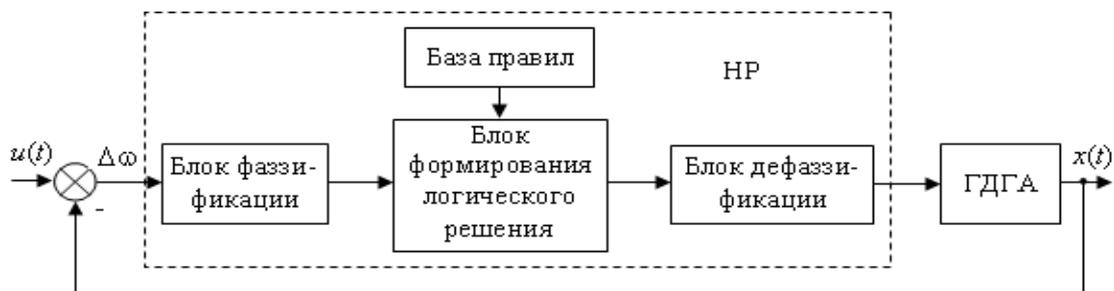


Рисунок 4.1 – Функциональная схема системы автоматического управления

В блоке фаззификации входные лингвистические переменные $x_i, i=1,2,\dots,n$, такие как ошибка системы ε , скорость изменения (первая производная) ошибки ε' , ускорение ошибки ε'' , качественно характеризуются терм–множествами, которые описываются на универсальном множестве u функциями принадлежности $\mu(u)$. Текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические.

В блоке формирования логического решения на основе матрицы знаний (базы правил), записываются лингвистические правила вида ЕСЛИ (исходная ситуация) ТО (ответная реакция). Соответствующей формулировкой правил достигается результат, при котором для любой лингвистической величины управляющего воздействия, как минимум одно из правил оказывается приемлемым.

В блоке дефаззификации полученная результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на объект управления преобразуется в числовую величину, как правило, методом определения «центра тяжести» плоскости результирующей фигуры, лежащей под графиком результирующей функции принадлежности. Общее правило расчета абсциссы центра тяжести $s_c=S(u_c,\mu_c)$ участка площади, охватываемой результирующей функцией $\mu(u)$ в пределах изменения переменной u от u_1 до u_2 , определяется по формуле:

$$u_c = \frac{\int_{u_1}^{u_2} u\mu(u)du}{\int_{u_1}^{u_2} \mu(u)du}.$$

Переходя к численному интегрированию методом трапеций с шагом дискретизации u_0 , получим:

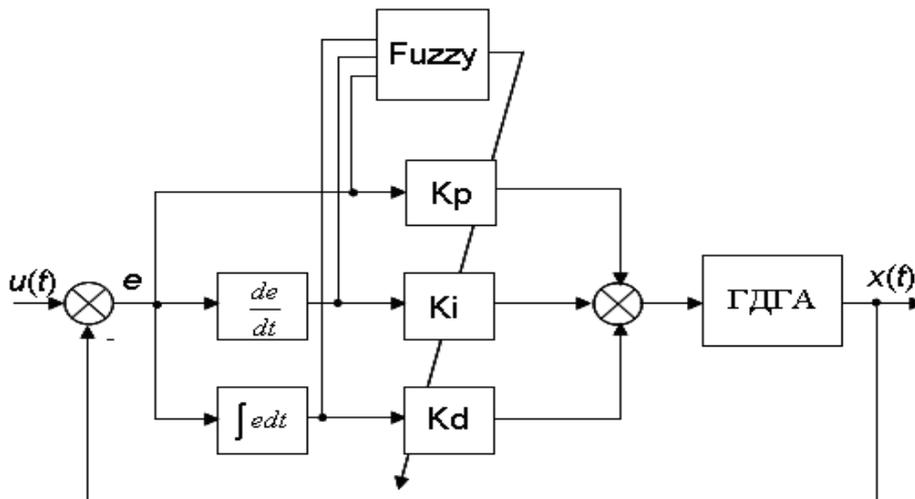
$$u_c = \frac{\frac{u_0\mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} u_i\mu_i + \frac{u_2\mu_M}{2}}{\frac{\mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} \mu_i + \frac{\mu_M}{2}},$$

где $\frac{u_2 - u_1}{M} = u_0$ – шаг дискретизации; M – число дискрет на интервале $u_2 - u_1$, $i=1,2,3,\dots, M-1$.

При реализации регулятора с использованием нечеткой логики на микропроцессоре удобно выбирать трапецевидные и треугольные формы термов (рисунок 4.2). Результирующая функция принадлежности в таком случае будет кусочно-линейной и центр тяжести определяется выражением:

$$u_c = \frac{\sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_k + (2a_k - a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)},$$

где N – число вершин; a_k, b_k – координаты вершин результирующей фигуры.



Рисунке 4.2 – Структурная схема

Полученное значение u_c затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления путем обратного отображения величины u_c с единого универсального множества на диапазон изменения $[m_{\min}, m_{\max}]$ лингвистической переменной управляющее воздействие на объект m .

Структура одного из возможных вариантов использования нечеткого регулятора для изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора оборотов ГДГА показана на рисунке 4.2.

В работе используется нечеткий регулятор типа Мамдани, спроектированный в Matlab (рисунок 4.3). Пакет Fuzzy Logic Toolbox в Matlab обладает простым интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечеткие модели.

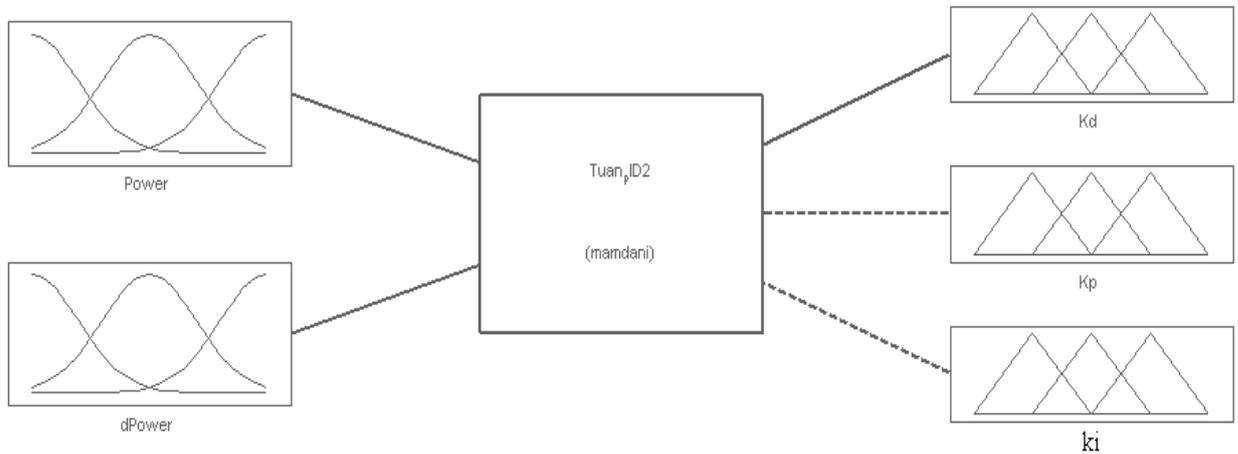


Рисунок 4.3 – Структура регулятора

В качестве входных переменных используются текущее значение мощности, потребляемой от ГДГА, а также скорость изменения мощности. Для каждой переменной заданы лингвистические термы, соответствующие некоторым диапазонам четких значений. Для входной переменной «мощность» (P) предполагается использовать три терма: PL – положительное малое, PM – положительное среднее, PH – положительное большое. Для входной переменной «скорость изменения мощности» (dP) используется три терма: NL – отрицательное малое, Z – близкое к нулю, PL – положительное малое. На рис.4.4,а и рис.4.4,б представлен вид функций принадлежности переменной «мощность» и «скорость изменения мощности» соответственно».

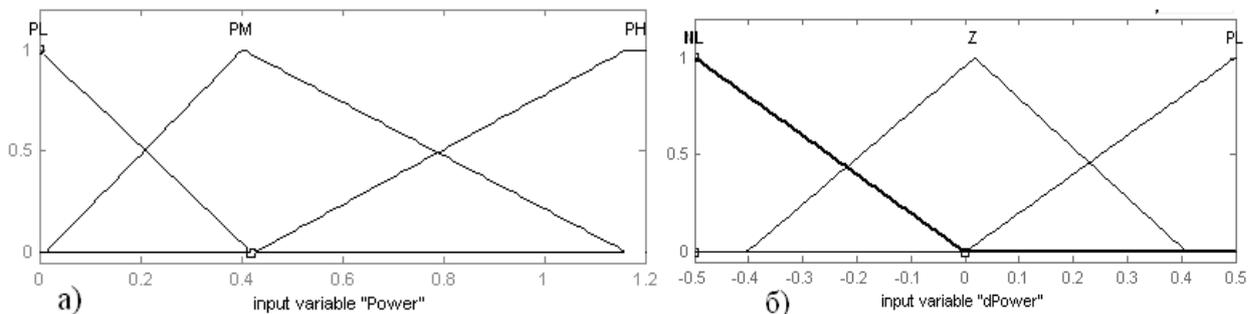


Рисунок 4.4 – Функции принадлежности регулятора

Аналитическая формула треугольной функции имеет вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

где a, b, c – параметры функций принадлежности.

База правил для Kd, Kp и Ki имеет вид:

Если $P=PL$ и $dP=NL$ То $Kd=PL, Kp=PL, Ki=PL$

Если $P=PL$ и $dP=Z$ То $Kd=PL, Kp=PL, Ki=PL$

Если $P=PL$ и $dP=PL$ То $Kd=PL, Kp=PM, Ki=PM$

Если $P=PM$ и $dP=NL$ То $Kd=PM, Kp=PM, Ki=PL$

Если $P=PM$ и $dP=Z$ То $Kd=PM, Kp=PM, Ki=PM$

Если $P=PM$ и $dP=PL$ То $Kd=PH, Kp=PM, Ki=PM$

Если $P=PH$ и $dP=NL$ То $Kd=PM, Kp=PH, Ki=PM$

Если $P=PH$ и $dP=Z$ То $Kd=PH, Kp=PH, Ki=PH$

Если $P=PH$ и $dP=PL$ То $Kd=PH, Kp=PH, Ki=PH$

Диапазон изменения выходов:

$$Kp=[Kp_{\min} Kp_{\max}]=[0 \ 0.02].$$

$$Ki=[Ki_{\min} Ki_{\max}]=[0 \ 0.00025].$$

$$Kd=[Kd_{\min} Kd_{\max}]=[0 \ 0.005].$$

Нелинейная зависимость коэффициента дифференциального звена регулятора в зависимости от значений на входе нечеткого регулятора показана на рисунке 4.5.

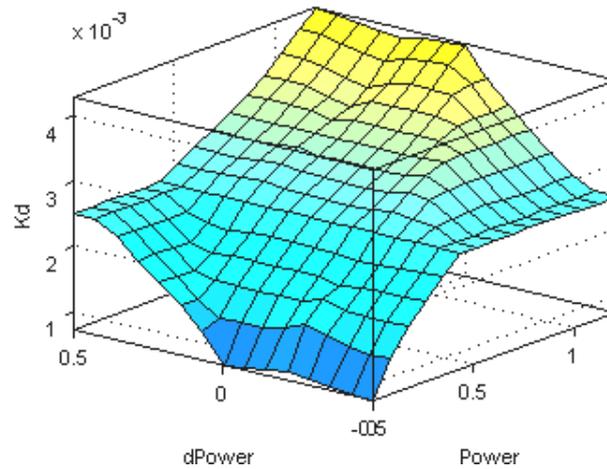


Рисунок 4.5 – Зависимость коэффициента дифференциального звена регулятора в зависимости от значений на входе нечеткого регулятора

Для коэффициента K_p пропорциональной составляющей поверхность нечеткого вывода имеет вид, показанный на рисунке 4.6.

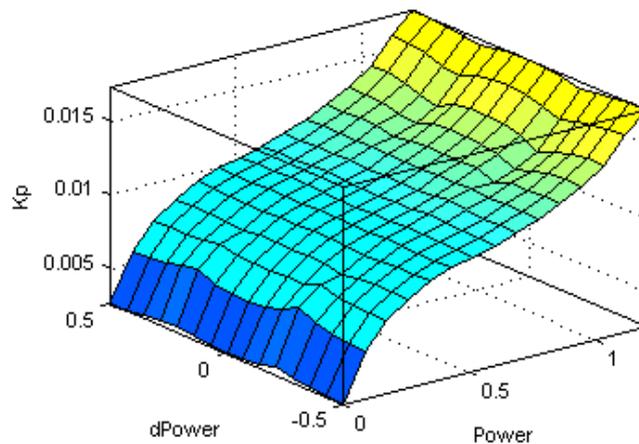


Рисунок 4.6 – Поверхность нечёткого вывода для коэффициента K_p

Для коэффициента K_i интегральной составляющей поверхность нечеткого вывода имеет вид, показанный на рисунке 3.17.

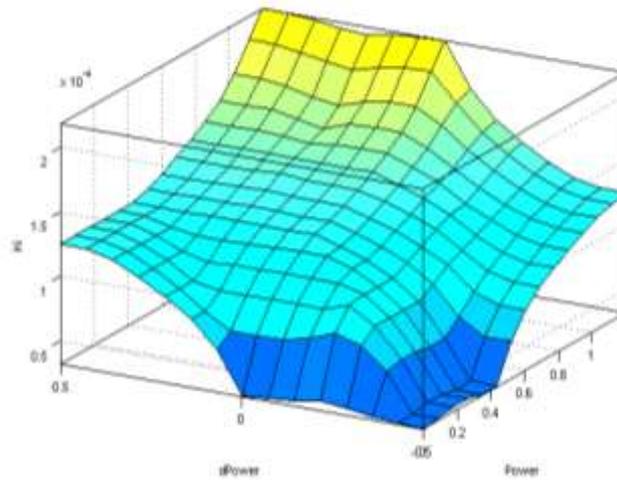


Рисунок 4.7 – Поверхность нечёткого вывода для коэффициента K_i

Нечеткие регуляторы реализуются на практике, как правило, в форме программного обеспечения высокого уровня (например, C++), что обеспечивает большую гибкость при их настройке. При этом по результатам моделирования и испытаний системы управления, содержащей нечеткий регулятор в замкнутом контуре, можно изменять количественные диапазоны лингвистических переменных, функции принадлежности и модифицировать базу правил с целью получения требуемого качества управления.

Метод корректирования коэффициентов автоматического регулятора оборотов ГДГА с помощью нечеткого регулятора является эффективным, так как позволяет расширить диапазон устойчивой работы ГД вплоть до аварийных режимов. По существу, введение нечеткого регулятора для подстройки коэффициентов традиционного ПИД-регулятора в функции параметров текущего режима работы ГДГА придает системе управления оборотами ГД свойство адаптивности. Поиск улучшения качества управления следует искать на пути усложнения информационных структур систем управления (переходом к многоконтурным, каскадным схемам и схемам с компенсацией возмущений).

4.2 Оценка эффективности стабилизации частоты вращения ГД

Как установлено в разделе 2, реально функционирующий ГДГА может рассматриваться как идеальная машина, на которую воздействует аддитивная помеха, физическая природа и параметры которой определены во втором разделе. Поскольку в реальной системе ПИД-регулятор настраивался лишь на одну точку рабочего диапазона, то есть все основания полагать, что предложенный алгоритм управления позволит существенно поднять стабильность оборотов ГД во всем диапазоне мощностей нагрузки.

На структурной схеме ГД, в соответствии с принятой методикой измерения, аддитивная помеха в виде дестабилизирующей функции f_ω прикладывается к выводу (рисунок 4.8).

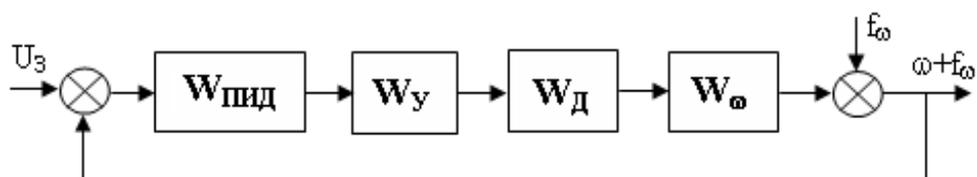


Рисунок 4.8 – Структурная схема ГД

где

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{ПИД}} &= \frac{T_n T_g p^2 + K_n T_n p + 1}{T_n p}; W_y = \frac{K_y}{T_y p + 1}; \\ W_d &= \frac{(T_{\text{TH}} p + 1)}{\frac{T_{\text{TH}}}{1 - K_d K_{\text{TH}}} p + 1} \cdot \frac{K_d}{1 - K_d K_{\text{TH}}}; W_\omega = \frac{1/D}{\frac{T_2}{D} p + 1} \end{aligned} \right\}.$$

Приняв $W_K = W_{\text{ПИД}} \cdot W_y \cdot W_d \cdot W_\omega,$

находим уровень помехи на выходе замкнутой системы f_{ω}

$$f_{\omega} = \frac{f_{\omega}}{1 + W_K} = f_{\omega} \cdot \frac{1}{1 + W_K} = f_{\omega} \cdot W_3.$$

Спектральная плотность помехи на выходе замкнутой системы

$$S_{\omega}(\omega) = S_{\omega} \cdot |W_3(j\omega)|^2 = S_{\omega} \cdot \left| \frac{1}{1 + W_K(j\omega)} \right|^2.$$

Из приведенной формулы, учитывая характер ЛАЧХ устойчивой системы для области эффективного подавления помехи, где $|W_K| \gg 1$:

$$S_{\omega}(\omega) \approx S_{\omega} \cdot \frac{1}{|W_K(j\omega)|^2}.$$

Рассмотрим теперь более детально ЛАЧХ замкнутой системы. С учетом (3.19) формула (3.20) может быть представлена в виде:

$$W_K = \frac{T_n T_g p + K_n T_n p + 1}{T_n p} \cdot \frac{K_y}{T_y p + 1} \cdot \frac{K_g \cdot (T_{\text{TH}} p + 1)}{\frac{T_{\text{TH}}}{1 - K_y K_{\text{TH}}} p + 1} \cdot \frac{1/D}{\frac{T_2}{D} p + 1} =$$

$$\frac{K_y}{D} \cdot \frac{K_d}{1 - K_d K_{\text{TH}}} \cdot \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}{(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + 1) p} \cdot \frac{1}{T_n p}$$

$$\text{где } a_3 = T_{\text{и}} T_{\text{д}} T_{\text{ТН}}; \quad a_2 = T_{\text{и}} T_{\text{г}} + K_{\text{п}} T_{\text{и}} T_{\text{ТН}}; \quad a_1 = K_{\text{п}} T_{\text{и}} + T_{\text{ТН}};$$

$$b_3 = \frac{T_{\text{г}} T_{\text{э}} T_{\text{ТН}}}{D(1 - K_{\text{ТН}} K_{\text{д}})}; \quad b_2 = T_{\text{г}} \frac{T_{\text{э}}}{D} + \frac{T_{\text{г}} T_{\text{ТН}}}{1 - K_{\text{ТН}} K_{\text{д}}} + \frac{T_{\text{э}} T_{\text{ТН}}}{D(1 - K_{\text{ТН}} K_{\text{д}})}; \quad b_1 = T_{\text{г}} + \frac{T_{\text{э}}}{D} + \frac{T_{\text{ТН}}}{1 - K_{\text{ТН}} K_{\text{д}}}.$$

В таблице 4.1. приведены вычисленные значения коэффициентов a_i и b_i для всего диапазона нагрузок ГДГА.

Таблица 4.1 – Вычисленные значения коэффициентов a_i и b_i

$a_i, b_i \backslash P$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
a_3	0	16,3	12,1	8,8	6,9	5,5
a_2	0	54,6	41	27,76	23,5	18,9
a_1	0	1,1	1,86	2,22	2,0	1,7
b_3	0	0,1	0,19	0,4	0,5	0,3
b_2	0	2,2	4,0	7,8	10,3	6,3
b_1	0	4,5	5,0	6,4	6,6	5,6

Из результатов расчета коэффициентов полиномов $A(a_i, p)$ и $B(b_i, p)$ вытекает, что они фактически компенсируют друг друга. При этом погрешность не превышает в узком частотном диапазоне 10 ДБ. По этой причине для оценки эффективности подавления помехи f_{ω} в оборотах дизеля можно W_k приближения в виде:

$$W_k \approx \frac{K_y K_{\text{д}}}{D(1 - K_{\text{д}} T_{\text{ТН}})} \cdot \frac{1}{T_{\text{и}} p} = \frac{K_{\text{э}}}{T_{\text{и}} p}.$$

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{1}{1+W_K(p)} = \frac{T_H p}{T_H p + K_Э} = \frac{\left(\frac{T_H}{K_Э}\right)}{\frac{T_H}{K_Э} p + 1}.$$

Спектральная плотность помехи в выходных оборотах двигателя:

$$S_{\omega_3}(\omega) = S(\omega) \cdot \frac{\left(\frac{T_H}{K_Э} j\omega\right)^2}{1 + \left(\frac{T_H}{K_Э}\right)^2 \omega^2}.$$

Дисперсия выходного сигнала определяется из известного выражения, используемого для определения корреляционной функции:

$$R_{\text{вых}}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\omega_3}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega.$$

которое для $\tau = 0$ преобразуется к виду $R_{\text{вых}}(0) = \sigma_{\text{вых}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\omega_3}(\omega) d\omega$. Поскольку

при значениях ω_1 , при которых $\left(\frac{T_H}{K_Э}\right)^2 \omega^2 \gg 1$, $W_3(j\omega) = 1$, то на спектр выходного

параметра влияет лишь низкочастотный диапазон, для которого:

$$W_3(j\omega) = \left(\frac{T_H}{K_Э}\right)^2 \omega^2.$$

В силу изложенного дисперсия выходного параметра с учетом значения $S(\omega)$ может быть определена по формуле:

$$R_{\text{Вых}}(0) = \sigma_{\text{Вых}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_{II}}{K_{\text{Э}}} \right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_{\text{Вх}}^2 \alpha}{\omega^2 + \alpha^2} \cdot \frac{d\omega}{\omega^2} = \left(\frac{T_{II} \cdot \sigma_{\text{Вх}}}{\sqrt{2} \cdot K_{\text{Э}} \cdot \alpha} \right)^2.$$

В результате находим, что при оптимальной настройке ПИД-регулятора для всего диапазона мощностей удастся теоретически снизить диапазон колебаний оборотов газодизеля в 25-30 раз.

4.3 Параллельная работа

Практические исследования проводились на автопароме «Олимпиада», имеющем на своём борту газодизель-генераторные агрегаты ГДГА-630 (двигатель 6ГЧН25/34), питающие гребной электродвигатель постоянного тока (через тиристорный управляемый выпрямитель) и общесудовые потребители. В экспериментальный комплекс также входило вспомогательное оборудование ГДГА и микроконтроллерная система управления, сопрягающая ГДГА с программным комплексом, реализованным в среде Matlab/Simulink.

На рисунке 4.9 приведены элементы ГДГА автопарома. На рисунке 4.10 – функциональная схема экспериментального комплекса с учетом взаимосвязи элементов.

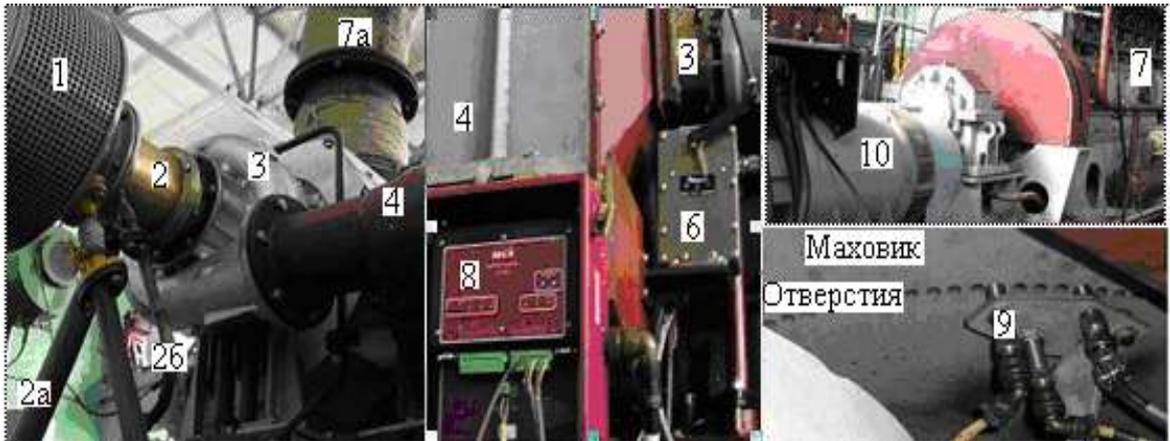


Рисунок 4.9 – Элементы ГДГА

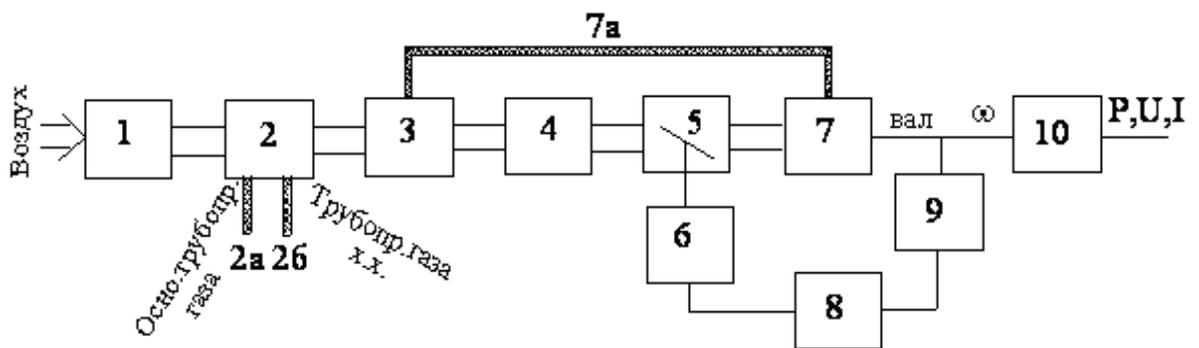


Рисунок 4.10 – Функциональная схема экспериментального комплекса

Воздушный поток через воздушный фильтр 1 (рисунок 4.10) подается в смеситель 2, к которому подводится газ по газовым трубам 2а и 2б. По трубе 2а подается основной поток газа, а по трубе 2б газ, необходимый для поддержания режима холостого хода. После смесителя газовоздушная смесь отбирается турбо-нагнетателем 3, с выхода которого, через охладитель 4 и регулируемую заслонку 5, подается в блок цилиндров 7 двигателя. Турбо-нагнетатель работает от выхлопных газов, которые поступают в него, через выходную трубу 7а. Заслонка управляется двигателем постоянного тока 6, управляющим сигналом которого является выходной сигнал ПИД-регулятора 8, реализованного в виде микроконтроллерной системы (на базе микроконтроллера STM32F407). В качестве датчиков оборотов используются датчики Холла 9.

Выбор данного типа микроконтроллера был обоснован соответствием его характеристик предъявляемым задачам: производительности, возможности вы-

полнения операций с плавающей запятой, наличие необходимых периферийных устройств и т.д.; наличием у него сертифицированности для критических условий эксплуатации и программных оболочек реального времени, а также сертифицированных для критических условий эксплуатации.

Модель автономной электростанции, на которой проводились исследования, представлена на рисунке 4.11 состоит из двух ГДГА, работающих на активно-индуктивную нагрузку различной мощности (200 кВт, 300 кВт, 300 кВт). ГДГА имеет в своем составе следующие блоки: модель газодизеля, системы возбуждения генератора, коммутаторы, блоки измерения сигналов, блоки для работы с COM – портом.

Нагрузка на ГДГА регулировалась посредством изменения оборотов гребного электродвигателя. Резкое изменение нагрузки реализовывалось посредством включения подруливающего устройства, использующего в качестве электропривода асинхронный двигатель.

Микроконтроллерная система управления (МКСУ) выполняла сбор данных с датчиков (обороты ГДГА, ток и напряжение на выходе генератора), обработку данных и пересылку их на персональный компьютер для сбора результатов эксперимента.

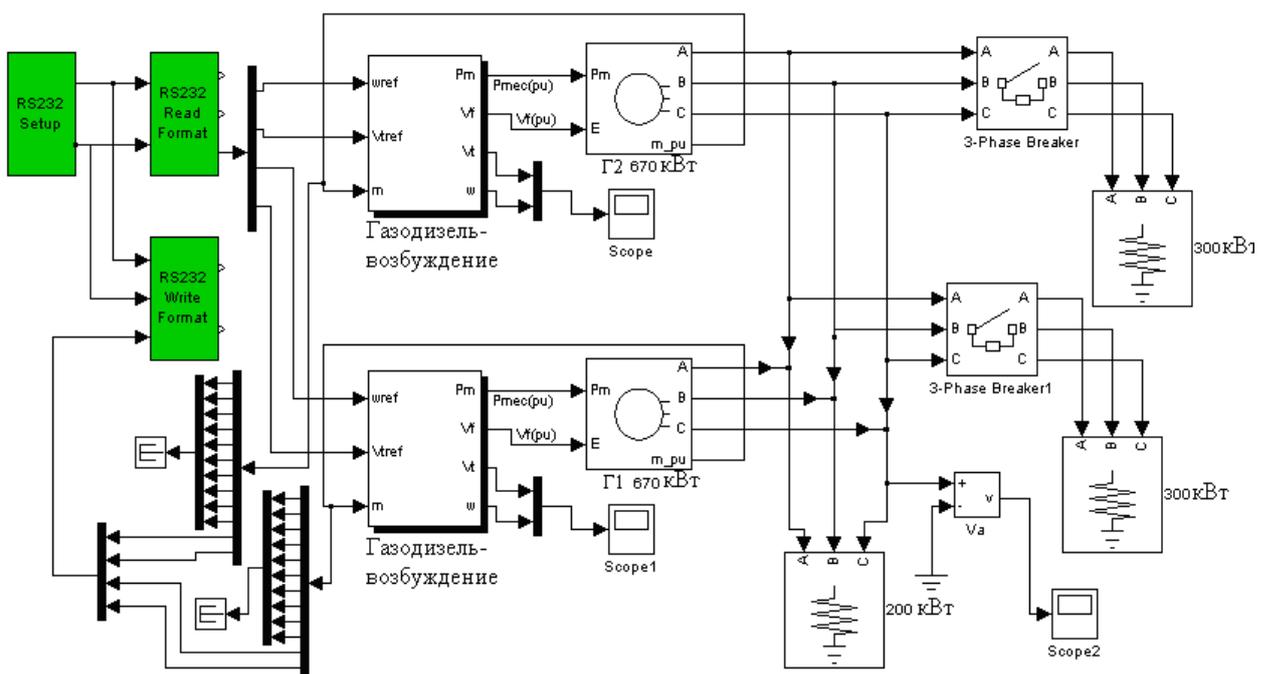


Рисунок 4.11 – Модель автономной электростанции с двумя ГДГА

На рисунке 4.12 приведены результаты исследования процесса стабилизации оборотов параллельно работающих ГДГА Γ_1 и Γ_2 , при резком изменении нагрузки. Из рисунка 4.12 видно, что использование нечёткого регулятора позволило качественно улучшить процесс стабилизации оборотов.

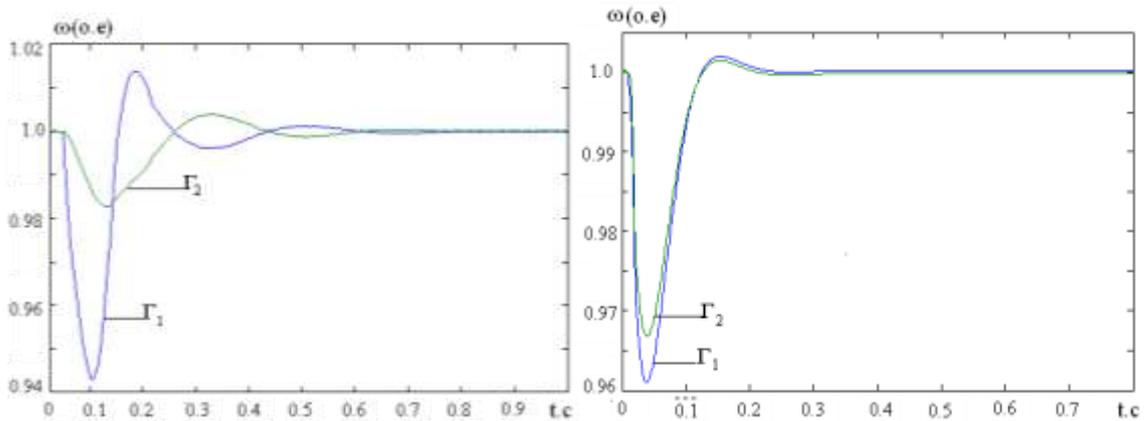


Рисунок 4.12 – Стабилизация оборотов ГДГА: а – без нечёткого регулятора; б – с нечётким регулятором

На рисунке 4.13 приведены результаты исследования переходного процесса активной мощности, генерируемой параллельно работающими ГДГА Γ_1 и Γ_2 , изменения которой вызваны колебаниями оборотов ГДГА при резком изменении нагрузки. Из рисунка видно, что использование нечёткого регулятора позволяет качественно улучшить точность распределения активной мощности между параллельно работающими генераторными агрегатами.

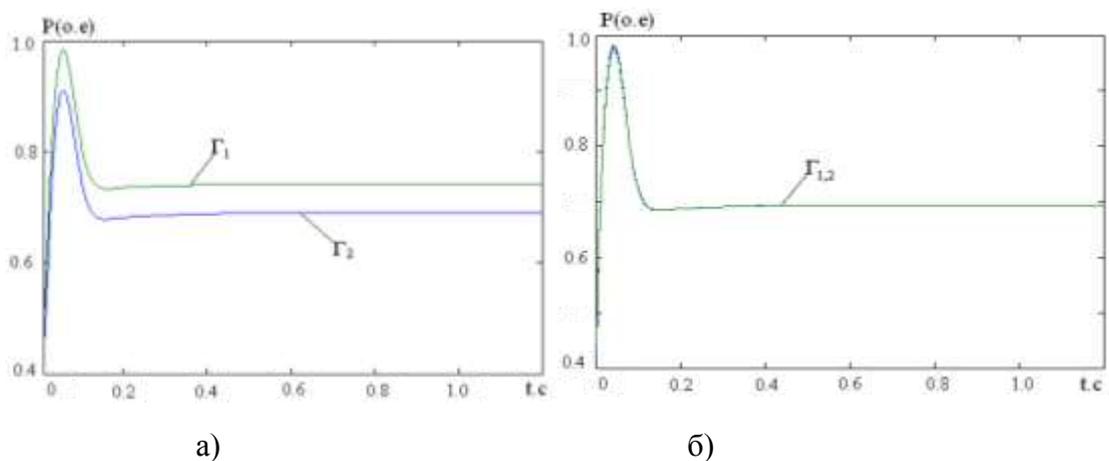


Рисунок 4.13 – Результат исследования переходного в ГДГА: а – без нечёткого регулятора; б – с нечётким регулятором

В разделе приводятся результаты оценки качества стабилизации частоты вращения ГДГА при использовании разработанного нечёткого РЧВ. Было найдено, что при оптимальной настройке ПИД-регулятора для всего диапазона мощностей теоретически удастся снизить диапазон колебаний оборотов ГДГА в 25-30 раз.

4.4 Выводы по разделу 4

1. Анализ работы АЭС позволил установить, что коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок приводит к колебаниям напряжений и частоты сети, спектр которых находится в том же частотном диапазоне, что и спектр колебаний оборотов ГДГА, что способствует возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами.

2. На основе оптимизации параметров ПИД-регулятора для каждой из нагрузок определены их нелинейные зависимости от величины нагрузки на валу ГДГА.

3. Разработанный комплекс аппаратно-программных средств управления параметрами ПИД-регулятора в зависимости от нагрузки ГДГА позволил оптимизировать динамические режимы его во всем диапазоне нагрузок и тем самым в 15-20 раз снизить дисперсию колебаний оборотов вала ГД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности процессов управления параметрами качества электроэнергии в автономных ЭЭС является одним из путей решения задач согласования параметров вырабатываемой и потребляемой электроэнергии и обеспечения надежного функционирования системы в различных режимах работы ЭЭС парама. Эта задача осуществима за счет использования адаптивных систем управления на основе микропроцессорной техники.

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Обоснована необходимость построения адаптивной системы управления процессом повышения качества электроэнергии. Показано, что, при определении установленной мощности ФКУ, наилучший показатель может быть достигнут с применением в системе управления ФКУ интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии.

2. Произведена формализация задачи оптимального управления ФКУ в автономной ЭЭС парама.

3. С использованием теории нейро-нечетких сетей разработана система интеллектуальной поддержки принятия решений при оптимальном управлении ФКУ, решающая задачу оптимизации на расширенных множествах по векторному критерию.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРВ	– автоматический регулятор возбуждения;
АРН	– автоматический регулятор напряжения;
АРЧ	– автоматический регулятор частоты;
АЭС	– автономная электростанция;
АЭЭС	– автономная электроэнергетическая система;
ГА	– генераторный агрегат;
ГД	– газодизель;
ГДГ	– газодизель-генератор;
ГДГА	– газодизель-генераторный агрегат;
ГРЩ	– главный распределительный щит;
ДВС	– двигатель внутреннего сгорания;
ДГ	– дизель-генератор;
ЛАЧХ	– логарифмическая амплитудная частотная характеристика;
ОУ	– объект управления;
РЧВ	– регулятор частоты вращения;
РЩ	– распределительный щит;
САРС	– система автоматического регулирования скорости;
САРЧ	– система автоматического регулирования частоты;
САРАМ	– система автоматического распределения активной мощности;
САУ	– систем автоматического управления;
САЭС	– судовая автоматизированная электростанция;
СЭЭС	– судовая электроэнергетическая система.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация судовых энергетических установок // Под ред. Р. А. Нелепина. – Л.: Судостроение, 1975. – 534 с.
2. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2001. – 20 с.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
4. Алексеев, Н. А. Микропроцессорная система управления судовой электроэнергетической системой «ASA-S» / Н. А. Алексеев, А. П. Баранов. – ГМА, 2000. – 130 с.
5. Алексеев, Н. А. Судовые микропроцессорные управления: проектирование и эксплуатация / Н. А. Алексеев. – СПб., ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2002. – 102 с.
6. Алексеев, Н. А. Эксплуатация судовых микропроцессорных систем / Н. А. Алексеев. – М.: Транспорт, 1994. – 208 с.
7. Андрианова, Л. П. Идентификация коэффициентов передаточных функций динамических объектов / Л. П. Андрианова, Ф. А. Шаймарданов. – Уфа: УГАТУ, 1997. – 195 с.
8. Андриющенко, А. И. Основы проектирования энерготехнологических установок электростанций / А. И. Андриющенко, А. И. Попов. – М.: Высш. школа, 1980. – 240 с.
9. Антонович, С. А. Динамические характеристики объектов регулирования судовых дизельных установок / С. А. Антонович. – Л.: Судостроение, 1966. – 234 с.
10. Архангельский, В. С. Регуляторы частоты вращения судовых дизелей / В. С. Архангельский. – Л.: Судостроение, 1989. – 173 с.

11. Баби́ков, М. А. Элементы и устройства автоматики / М. А. Баби́ков, А. В. Косинский. – М.: Высшая школа, 1973. – 253 с.
12. Баков, Ю. В. Проектирование электрической части электростанций с применением ЭВМ / Ю. В. Баков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
13. Баландин, Ф. И. Расчет и проектирование автоматических систем с применением ЭЦВМ / Ф. И. Баландин. – Николаев: НКИ, 1984. – 60 с.
14. Баранов, А. П. Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками / А. П. Баранов. – М.: Транспорт, 1981. – 246 с.
15. Баранов, А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов. – Транспорт, 1988. – 328 с.
16. Беляев, И. Г. Автоматизация процессов в судовой энергетике / И. Г. Беляев, Н. Г. Курзенков, В. И. Седых, В. Н. Слесаренко. – Владивосток, 1999. – 401 с.
17. Бендат, Д. Применение корреляционного и спектрального анализа / Д. Бендат, А. Пириол. – М.: «МИР», 1983. – 312 с.
18. Бесекерский, В. А. Микропроцессорные системы автоматического управления / В. А. Бесекерский и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 365 с.
19. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
20. Богомолов, В. С. Судовые электроэнергетические установки подчиненного управления / В. С. Богомолов. – Калининград: Кн. изд-во, 1996. – 240 с.
21. Болотин, Б. И. Инженерные методы расчётов устойчивости судовых автоматизированных электростанций / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер. – Л.: Судостроение, 1974. – 324с.
22. Болотин, Б. И. Исследование устойчивости параллельной работы дизель-генераторов ДГР 150/750 совместно с устройствами автоматики на математической модели / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Труды ЦНИДИ. – 1968. – Вып. 56. – С. 245–258.

23. Болотин, Б. И. К вопросу структурного анализа судовых автоматизированных электростанций переменного тока / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Сб. НТО Судостроительной промышленности. –1971. – Вып. 167. – С. 5–13.
24. Бордюг, А. С. Модели пространства образов морских интеллектуальных систем в условиях неопределенности / А. С. Бордюг, И. Л. Титов, В. А. Доровской // Морское Образование: Традиции, Реалии и Перспективы. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. – С. 14–18.
25. Бордюг, А. С. Моделирование элементов идентификации и контроля параметров системы для интеллектуальной поддержки принятия решений / А. С. Бордюг, И. Л. Титов, А. А. Железняк // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. – 2016. – № 3. – С. 75–85.
26. Брежнев, В.И. Ресурсы серверно-сетевого управления энергоустановками / В.И. Брежнев, А.Б. Шадрин // Научное обозрение. – 2014. – № 1. – С. 72–79.
27. Бут, Д. А. Синтез автономных электроэнергетических систем / Д. А. Бут // Электричество. –1994. – № 1. – С. 1–17.
28. Василевский, В. И. Автомобильные генераторы / В. И. Василевский. – М.: Высшая школа, 1978. – 159 с.
29. Васильев, М. В. Определение динамических свойств судовых дизельных установок в условиях нормальной эксплуатации / М. В. Васильев // Вестник МГТУ. – 2006. – №9(2). – С. 301–303.
30. Вейц, В. Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. –383 с.
31. Веников, В. А. Кибернетические модели электрических систем / В. А. Веников. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 328 с .
32. Веретенников, Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы / Л. П. Веретенников. – Л.: Судостроение, 1975. –376 с.

33. Веретенников, Л. П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей / Л. П. Веретенников. – Л.: Ленинград, 1982. – 626 с.
34. Виноградова, Л.В. Применение газовых топлив в двигателях внутреннего сгорания / Л.В. Виноградова, В. В. Горбунова, Н. Н. Патрахальцева и др. – М.: ИРЦ, ГАЗПРОМ, 1996. – 198 с.
35. Галеев, В. Л. Исследование характеристик дизеля с турбонаддувом и регулируемым углом определения топлива / В. Л. Галеев, И. В. Леонов // Двигатели внутреннего сгорания. – 1990. – № 51. – С. 15–20.
36. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.
37. Горелик, Г. Б. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками / Г. Б. Горелик. – Хабаровск: Изд-во, 2001. – 21 с.
38. Горелик, Г. Б. Автоматизированные системы управления судовых энергетических установок / Г. Б. Горелик. – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос. техн. унта, 1999. – 36 с.
39. Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К.: Радиоаматор, 2003. – 512 с.
40. Грунауэр, А. А. Анализ влияния нелинейностей на динамические качества САР турбонаддува ДВС / А. А. Грунауэр, А. Г. Рыбалченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 1982. – Вып. 35. – С. 66–70.
41. Грунауэр, А. А. Микропроцессорный регулятор частоты вращения транспортного дизель-генератора / А. А. Грунауэр, И. Д. Долгих, В. М. Никитин, В.А. Семенович // Двигатели внутреннего сгорания. – 1983. – Вып. 44. – С. 18–26.
42. Гусаков, С. В. Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания / С. В. Гусаков, Н. Н. Патрахальцев. – М.: Изд-во РУДН, 2004. – 122 с.
43. Гусаков, С.В. Расчет характеристик комбинированного дизеля: Учебное пособие / С.В. Гусаков, П.Р. Вальехо Мальдонадо. – М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2006. – 36 с.

44. Долгих, И. Д. Исследование микропроцессорной САР частоты вращения транспортного дизеля на основе математического моделирования / И. Д. Долгих // Двигатели внутреннего сгорания. – 1986. – Вып. 46. – С. 86–91.
45. Долгих, И. Д. Микропроцессорный регулятор частоты вращения транспортного дизель-генератора / И. Д. Долгих // Двигатели внутреннего сгорания. – 1986. – Вып. 44. – С. 42–45.
46. Долгих, И. Д. Принципы согласования параметров при синтезе микропроцессорных САР частоты вращения дизеля/двигатели внутреннего сгорания / И. Д. Долгих, П. П. Петров. – 1982. – Вып. 46. – С. 92–97.
47. Дульгер, М. В. Газовая динамика и агрегаты наддува / М. В. Дульгер, Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов, В. А. Треплин. – Волгоград: ВолгПИ, 1989. – 330 с.
48. Дьяконов В. П., Круглов В. И. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / В. П. Дьяконов, В. И. Круглов. – Питер, 2003. – 448 с.
49. Дьяконов, В. П. MATLAB 6. Учебный курс / В. П. Дьяконов. – СПб.: Санкт-Петербург, 2001. – 592 с.
50. Дьяконов, В. П. Matlab 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
51. Дьяконов, В. П. SIMULINK 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб.: Санкт-Петербург, 2002. – 528 с.
52. Дьяконов, В. П. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. И. Круглов. – СПб.: Санкт-Петербург, 2001. – 480 с.
53. Дьяконов, В. П. Справочник по применению системы PC MatLAB / В. П. Дьяконов. – М.: Наука, Физматлит, 1993. – 112 с.
54. Жадобин, Н. Е. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики / Н. Е. Жадобин, А. П. Крылов, В. А. Малышев. – Санкт-Петербург ЭЛМОР, 1998. – 439 с.
55. Железняк, А. А. Методы анализа нечетких стохастических процессов судовой электроэнергетической системы газодизельных двигателей / А. А. Же-

- лезняк, И. Л. Титов, А. С. Бордюг // Рыбное хозяйство . – 2016. – № 3. – С. 85–88.
56. Жиленков, А. А. Алгоритмизация процесса оптимального управления обобщенным показателем качества для сложных структур / А. А. Жиленков, С. Г. Чёрный, И. Л. Титов, Л. Н. Козаченко // Вестник аграрной науки Причерноморья. – 2014. – № 1 (77). – С. 188–196.
57. Жиленков, А. А. Использование элементов математической модели в условиях неопределенности для идентификации сложных процессов / А. А. Жиленков, С. Г. Чёрный, А. А. Железняк, И. Л. Титов // Технологические системы. – 2014. – № 2. – С. 59–64.
58. Жиленков, А. А. Моделирование процесса повышения надежности автоматических систем управления в автономных системах объектов морского транспорта / А. А. Жиленков, И. Л. Титов, С. Г. Чёрный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 4 (32). – С. 198–207.
59. Жиленков, А.А. Уточненная математическая модель газодизеля для исследования многогенераторных систем / А.А. Жиленков, С.Г. Черный, И.Л. Титов, А.С. Бордюг // Датчики и системы. – 2016. – № 8-9 (206) . – С. 33-41.
60. Жуков, В. А. Повышение эффективности систем автоматического управления источниками энергии автономных буровых установок / В. А. Жуков, А. А. Жиленков, О. К. Безюков, И. Л. Титов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 6. – № 2 (78). – С.4–10.
61. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М., Энергия, 1975. – 184 с.
62. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541с.
63. Измерительный преобразователь активной и реактивной мощности Е849/6-М1/Технический паспорт. – Могилев, 2000. – 12 с.
64. Киричков, В. Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В. Н. Киричков. – К.: Вища школа, 1990. – 187 с.

65. Климанов, О. Н. Разработка систем уравнений для нормализации расчетов переходных процессов в СЭС / О. Н. Климанов // Труды ЦНИИСЭТ. – 1970. – Вып. 1. – С. 3–9.
66. Ключев, А. С. Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования / А. С. Ключев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 386 с.
67. Ключев, А. С. Автоматическое регулирование / А. С. Ключев – М., Энергия, 1973. – 280 с.
68. Ковалевский, Е. С. Переходные процессы в дизель-генератора / Е. С. Ковалевский. – Л., 1977. – 166 с.
69. Коллеров, Л. К. Газовые двигатели поршневого типа / Л. К. Коллеров. – М.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
70. Константинов, В. Ц. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок / В. Ц. Константинов. – Л.: Судостроение, 1988. – 312 с.
71. Королев, Н. И. Регулирование судовых дизелей / Н. И. Королев. – М.: 1983. – 144 с.
72. Королева, Т. Н. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / Т. Н. Королева и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 64 с.
73. Краснов, В. В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем / В. В. Краснов, П. А. Мещанинов, А. П. Мещанинов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
74. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
75. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 615 с.
76. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 415 с.
77. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 145 с.

78. Крутов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1978. – 471 с.
79. Крутов, В. И. Равновесная характеристика двух импульсной САР / В. И. Крутов, В. А. Горшков, А. Г. Кузнецов, И. В. Леонов, В. И. Шатров // Двигатели внутреннего сгорания. – 1985. – Вып. 41. – С. 60–64.
80. Крутов, В. И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Наука, 1980. – 92 с.
81. Крутов, В. И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Недра, 1980. – С. 83–91.
82. Крутов, В. И. Регулирование турбонаддува ДВС / В. И. Крутов, А. Г. Рыбальченко. – М.: Высш. шк., 1978. – 213 с.
83. Крутов, В. И. Сборник задач по автоматическому регулированию двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.
84. Кузнецов, Б. П. Стандартная реализация управляющих программ. Судостроительная промышленность / Б. П. Кузнецов // Системы автоматизированного проектирования. – 1986. – Вып.1. – С. 51–55.
85. Кутьин, Л. И. Комплексная автоматизация судовых дизельных и газотурбинных установок / Л. И. Кутьин, Л. И. Исаков. – Л.: Судостроение, 1984. – 251 с.
86. Ланчуковский, В. И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок / В. И. Ланчуковский, А. В. Козьминых. – М.: Транспорт, 1990. – 335 с.
87. Ланчуковский, В. И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок / В. И. Ланчуковский, А. В. Козьминых. – Москва: Транспорт, 1983. – 316 с.
88. Левин, М. И. Автоматизация судовых дизельных установок / М. И. Левин. – Издательство: Судостроение, 1969. – 465 с.
89. Левинштейн, М. Л. Статическая устойчивость электрических систем / М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев. – СПб.: СПбГТУ, 1994. – 264 с.

90. Леонов, И. В. Автоколебания двухимпульсной САР комбинированного двигателя / И. В. Леонов // Двигатели внутреннего сгорания. – 1984. – Вып. 40. – С. 33–37.
91. Лепский, А. Г. Основные направления развития систем комплексной автоматизации на флоте / А. Г. Лепский, В. В. Цветков, А. А. Щеглов // Вестник МГТУ. – 2004. – т.7. – № 3. – С. 409–418.
92. Лукас, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
93. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – Машиностроение, 1982. – 504 с.
94. Мещанинов, П. А. Автоматизация судовых электроэнергетических систем / П. А. Мещанинов. – Л.: Судостроение, 1970. – 368 с.
95. Митин, В. И. Применение аналитических преобразований на ЭВМ для кинестатического динамического исследования двигателей типа Д-70 / В. И. Митин, Л. И. Штейнвольф // Двигатели внутреннего сгорания. – 1988. – Вып. 48. – С. 41–45.
96. Михайлов, В. А. Автоматизация судовых электростанций / В. А. Михайлов, Б. И. Норневский. – Л.: Судостроение, 1966. – 319 с.
97. Михайлов, В. С. Судовая электроавтоматика / В. С. Михайлов. – Л.: Судостроение, 1970. – 495с.
98. Молотов, В. Т. Влияние запаздывания в системе регулирования дизель-генератора на её устойчивости / В. Т. Молотов, Л. И. Березовский, А. П. Токин // Двигатели внутреннего сгорания. – 1984. – Вып. 40. – С. 41–45.
99. Молотов, В. Т. Динамика комбинированной системы регулирования дизель-генератора / В. Т. Молотов, П. Я. Токин, П. И. Березовки // Двигателестроение. – 1982. – № 11. – С. 40–44.
100. Муромцев, Ю. Л. Микропроцессорные системы энергосберегающего управления / Ю. Л. Муромцев, Л. П. Орлова. – Тамбов, 2001.– 80 с.
101. Мэтьюз, Дж. Г. Численные методы. Использование MATLAB. Пер. с англ / Дж. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2001. – 720 с.

102. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. Л. Чернова. – М.: Физматгиз, 1965. – 340 с.
103. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, П. А. Калантаров. – Л.: ГЭИ, 1959. – Ч. 3. – 232 с.
104. Нелепина, Р. А. Автоматизация судовых энергетических установок / Р. А. Нелепина. – Л.: Судостроение, 1975. – 134 с.
105. Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем / Н. И. Овчаренко. – Москва: Издательство НЦ ЭНА, 2001. – 504 с.
106. Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта / В. А. Доровской, А. А. Зинченко, Е. Г. Зинченко [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 1. – С. 67-78. – DOI 10.24143/2073-1574-2022-1-67-78. – EDN OLBDJT.
107. Обзор эффективных методов идентификации параметров электрической сети судов для повышения эксплуатационных качеств / С. Г. Черный, В. А. Жуков, А. С. Соболев [и др.] // Морская радиоэлектроника. – 2022. – № 1(79). – С. 42-47. – EDN KQVLPU.
108. Орлина, А. С. Двигатели внутреннего сгорания / А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – Москва: Машиностроение, 1985. – 489 с.
109. Патрахальцев, Н. Н. Аппаратура для газодизельного процесса / Н. Н. Патрахальцев // Автомобильная промышленность. – 1988. – № 6. – С. 51–52.
110. Подчукаев, В. А. Теория автоматического управления (аналитические методы) / В. А. Подчукаев. – М.: Физматлит, 2004. – 392 с.
111. Прохоренков, А. М. Судовая автоматика / А. М. Прохоренков, В. С. Солодов, Ю. Г. Татьянченко. – М.: Колос, 1992. – 448 с.
112. Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания / И. Я. Райков. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.
113. Ржепецкий, К. Л. Судовые двигатели внутреннего сгорания / К. Л. Ржепецкий, Е. А. Сухарева. – Л.: Судостроение, 1984. – 168 с.

114. Рябенский, В.М. Моделирование газодизель-генераторных агрегатов и оптимизация параметров их ПИД-регуляторов в Matlab/Simulink / В.М. Рябенский, В.И. Воскобоев, Нгуен Ван Тхань, В.П. Мишустов // Вестник ХНТУ. – 2011. – №2 (41). – С. 392–396.
115. Сахаров, В.В. Моделирование стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях средствами нелинейного программирования / В.В. Сахаров, А.А. Чертков, С.В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 3 (31). – С. 156–164.
116. Сахаров, В.В. Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В.В. Сахаров, А.А. Чертков, С.В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 3 (37). – С. 201–211.
117. Сахаров, В.В. Предиктивное апериодическое управление динамическими объектами на водном транспорте с использованием математического программирования / В.В. Сахаров, А.А. Чертков, С.В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 5 (39). – С. 206–214.
118. Сейдж, Э. П. Идентификация систем управления / Э. П. Сейдж, Дж. Л. Мелса. – М.: Наука, 1974. – 246 с.
119. Скаженик, А. М. Исследование влияния угла определения впрыскивания топлива на параметры работы тепловозного дизеля 10Д-100 / А. М. Скаженик, Ф. В. Гринсберг // Двигатели внутреннего сгорания. – 1984. – Вып. 40. – С. 37–41.
120. Смолоник, С. В. Методы математического моделирования переходных процессов высокоиспользуемых и нетрадиционных синхронных генераторов электроэнергетической системы / С. В. Смолоник. – Ленингр. пол. ин-т., 1988. – 421 с.

121. Солодов, В. С. Преобразование полиномиальных моделей, построенных по экспериментальным данным / В. С. Солодов, А. В. Власов // Вестник МГТУ. – 2006. – том 9. – №2. – С. 337–350.
122. Солодов, В. С. Применение методов планирования активного эксперимента для идентификации судового комплекса / В. С. Солодов, Ю. И. Юдин // Вестник МГТУ. – 2006. – том 9. – №2. – С.187–190.
123. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 182 с.
124. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
125. Интроспективный анализ современных судовых систем автоматизации / В. С. Соболев, А. А. Зинченко, И. В. Антипенко [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 10. – С. 72-75. – EDN ULBBQT.
126. Суевалов, Л. Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем / Л. Ф. Суевалов. – Л.: Судостроение, 1977. – 375 с.
127. Сыромятников, В. Ф. Наладка автоматики судовых энергетических установок / В. Ф. Сыромятников. – Л.: Судостроение, 1989. – 351 с.
128. Теория автоматического управления в 2-х ч. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, и др. – М.: 1986. – 367 с.
129. Титов, И. Л. Анализ современных методов обеспечения безопасности морских нефтегазовых объектов / И. Л. Титов, А. А. Жиленков, С. Г. Чёрный // НЕФТЬ И ГАЗ – 2015. – Москва, 2015. – С. 35.
130. Титов, И. Л. Применение робототехнических систем для морских интеллектуальных буровых платформ (технологические аспекты) / И. Л. Титов, А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С.Г. Черный // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2015). – Москва, 2015. – Т. 2. – С. 224–227.
131. Титов, И. Л. Использование эргономических систем в газовых и двухтопливных двигателях для распределения нагрузки / И. Л. Титов // Вестник

- государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 5(39). – С. 196–205.
132. Ткаченко, А. Н. Судовые системы автоматического управления и регулирования / А. Н. Ткаченко. – Л.: Судостроение, 1984. – 228 с.
133. Ткаченко, В. Н. Параметрическая идентификация нелинейных систем в условиях бифуркации / В. Н. Ткаченко, А. В. Ткаченко // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація. – 2004. – Вип. 65.– С. 57–62.
134. Толщин, В. И. Переходные процессы в дизель-генераторах / В. И. Толщин, Е. С. Ковалевский. – Л., 1977. – 166 с.
135. Толщин, В. И. Экспериментально-расчетный метод исследования обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генератора с сетью / В. И. Толщин, Б. И. Болотин // Энергомашиностроение. – 1967. – № 9. – С. 38–45.
136. Топорков, В. П. Повышение запаса устойчивости параллельной работы генераторных агрегатов в корабельной электроэнергетической системе / В. П. Топорков, Д. Ю. Копытов // Судостроение. – 2004. – № 4.– С. 49–51.
137. Тузов, Л.В. Система серверно-сетевого управления транспортными средствами / Л.В. Тузов, А.Б. Шадрин // Двигателестроение. – 2006. – № 2. – С. 37–41.
138. Хачиян, А. С. Двигатели внутреннего сгорания / А. С. Хачиян, К. А. Морозов, В. И. Трусов. – М.: Высш. школа, 1978. – 280 с.
139. Чёрный, С. Г. Математические аспекты при выборе навигационных комплексов экспертными группами / С. Г. Чёрный, И. Л. Титов, А. С. Бордюг // Материалы конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2014). – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С. 534–538.
140. Щеглов, А. А. Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания / А. А. Щеглов // Вестник МГТУ. – 2006. – том 9. – №2 . – С. 312–317.

141. Budnik, V. Future Development of the World Ocean Mining for the Industry / V. Budnik, S. Chernyi // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 2150–2156.
142. Cai, Chengtao. Ship diesel engine fault diagnosis based on the SVM and association rule mining / Chengtao Cai, Hongri Zong, Baolu Zhang // 2016 IEEE 20th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). – 2016. – P. 400–405.
143. Kr. Sharma, Avdhesh. Empirical modeling of dual fuel engine operated on producer gas and pilot diesel fuel / Avdhesh Kr. Sharma // *Power India Conference, 2012 IEEE Fifth*. – 2012. – P. 1–5.
144. Kurth, J. Automation strategies for a particle filter system for diesel engines / J. Kurth, H. Rake // *3 IEEE Conf. on Control Appl.* – 1994. – Vol.1. – P. 127–132.
145. Emelianov, V. Information System for Diagnosing the Condition of the Complex Structures Based on Neural Networks / V. Emelianov, S. Chernyi, A. Zinchenko, N. Emelianova, E. Zinchenko, K. Chernobai // *Energies*, 2022; Vol.15(9):2977. <https://doi.org/10.3390/en15092977> Q1
146. Emelianov, V. The Mathematical Models of the Operation Process for Critical Production Facilities Using Advanced Technologies / V. Yemelyanov, A. Zhilenkov, S. Chernyi, A. Zinchenko, E. Zinchenko // *Inventions*, 2022, Vol. 7(1):8. <https://doi.org/10.3390/inventions7010008> Nyrkov, A. Complex modeling of power fluctuations stabilization digital control system for parallel operation of gas-diesel generators / A. Nyrkov, S. Sokolov, A. Zhilenkov, S. Chernyi // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – 2016. – P. 636–640
147. Prakash Makhija, Satya. Analysis of effects on hybrid power system's costs and pollutant emissions due to replacement of petroleum diesel with natural gas, fuel oil and biodiesel / Satya Prakash Makhija, S P Dubey // 2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). – 2016. – P. 276–282.
148. Prakash Makhija, Satya. Analysis of effects on hybrid power system's costs and pollutant emissions due to replacement of petroleum diesel with natural

- gas, fuel oil and biodiesel / Satya Prakash Makhija, S. P. Dubey // 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). – 2016. – P. 276–282.
149. Qian, Du. Research of the influence of combustion chamber structure on performance of dual fuel engine / Du Qian, Ma Fengxian // Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference. – 2011. – P. 2498–2500.
150. Rutkowska, D. M. Pilinsky and L. Rutkowski, Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems / D. Rutkowska, M. Pilinsky, L. Rutkowski. – Hotline Telecom, 2004. – 452 p.
151. Ryabenkiy, V. M. Optimization of the controller's parameters of the gas-diesel generator unit / V. M. Ryabenkiy, A. O. Ushkarenko // Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2012 International Conference. – 2012. – P. 460–460.
152. Ryabenkiy, V. M. Reduction of frequency oscillation of the gas-diesel generator units / V. M. Ryabenkiy, A. O. Ushkarenko, Al-Suod Mahmud Mohammad // Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2012 International Conference, 2012. – P. 447–447.
153. Sokolov, S. S. Analysis of the status of marine automation systems problems on the example of modern technological networks / S. S. Sokolov, S. G. Chernyi, I. L. Titov, A. S. Bordug // 10th IEEE International Conference On Application Of Information And Communication Technologies, Baku – 2016. IEEE Xplore TM IEEE Catalog Number CFP1656H-ART, ISBN 978-1-5090-1841-3.
154. Sokolov, S. S. Self-contained drilling rig automatic control system efficiency improvement by means of assuring compatibility and integration methods development / S. S. Sokolov, S. G. Chernyi, A. A. Zhilenkov, I. L. Titov // Metallurgical and mining industry. – 2015. – Vol.7 (3). – P. 66–73.
155. Wenhua, Yuan. Engine's Working Characteristics with Blended Fuel of Biodiesel and DieselOil in HCCI Combustion Mode / Yuan Wenhua, Fu Jun, Tang Weixin, Yang Jianhua, Peng Yu, Tang Ning // Intelligent Systems Design and Engineering Applications 2013 Fourth International Conference. – P. 291–297.

156. Yue, H. Petri-net-based robust supervisory control of automated manufacturing systems / H. Yue, K. Xing, H. Hu, W. Wu, H. Su // Control Engineering Practice. – 2016. – vol. 54. – P. 176–189.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ

После запуска алгоритма (рисунок А.1) на выполнение выполняется проверка возможности загрузки ГД. Для этого используется информация, которая поступает из системы сбора данных. Расчет момента выполняется по выражению (2.1).

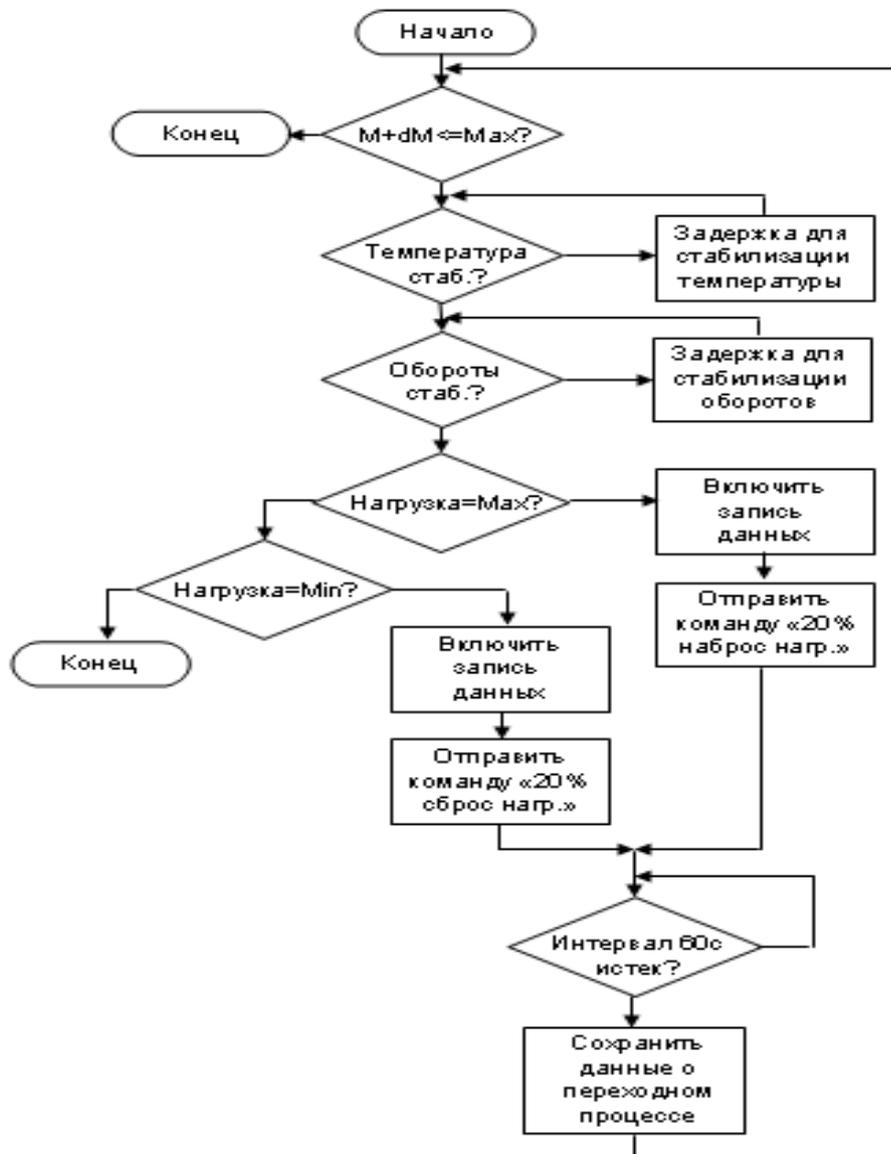


Рисунок А.1 – Алгоритм программы испытания

Затем проверяется стабильность температуры. Для этого анализируется производная температуры, и если она меньше заданной границы, выполняется следующий шаг алгоритма. В противном случае, формируется задержка, в течение которой происходит стабилизация теплового режима. Аналогичным образом (т.е. анализом производной) определяется стабильность оборотов.

Отсутствие колебаний оборотов будет свидетельствовать о завершении переходного процесса, а, следовательно, разрешается выполнение следующего шага алгоритма, в котором выполняется контроль нагрузки газодизель-генераторного агрегата. Если мощность ГД еще не достигла номинального значения, включается процедура записи данных о переходном процессе. После этого формируется команда увеличения нагрузки ГД на 20 %. Запись данных выполняется в течении 60 секунд, пока происходит стабилизация режима работы дизеля. Потом данные сохраняются в файл на жесткий диск компьютера. Этот цикл повторяется до тех пор, пока нагрузка на ГДГА не достигнет номинальной величины. Если это произошло, то начинает выполняться другая ветвь алгоритма. Выполняется запись данных о переходном процессе при сбрасывании нагрузки, которая составляет 20 % от номинальной мощности ГД. Эти данные также записываются на диск. Когда полный цикл нагрузки/разгрузки генератора выполнен, и данные о переходных процессах сохраненные на диск, программа завершает свою работу.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Наиболее качественно и эффективно коэффициенты полинома определяются с использованием современных программных средств. В *MatLab-Simulink* предусмотрены детальные процедуры аппроксимации экспериментальных данных полиномиальной функцией с одновременным расчетом возникающих погрешностей.

Для выполнения аппроксимации в командной строке системы MATLAB введём векторы входных и выходных данных:

$$X=[0 \ 50 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250];$$

$$Y=[56 \ 55 \ 54 \ 52 \ 50 \ 48],$$

которые соответствуют некоторой экспериментальной кривой (рисунок Б.1)

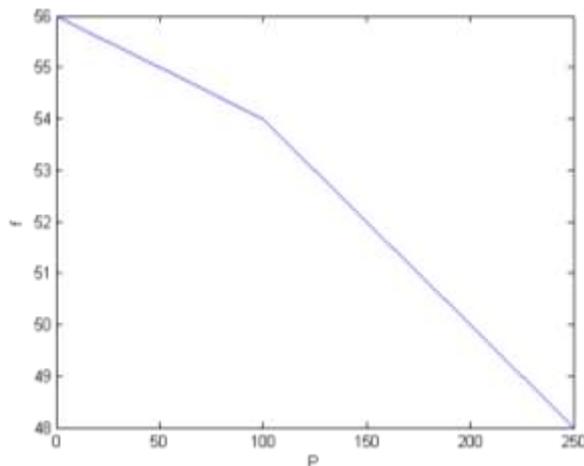


Рисунок Б.1 – Кривая, построенная по заданным точкам эксперимента

Далее выполняется следующая последовательность операций:

1. Из меню *Tools (Утилиты)* вызывается команда *Basic Fitting (Оборудование)* и в результате открывается новое окно *Basic Fitting* (рисунок Б.2).

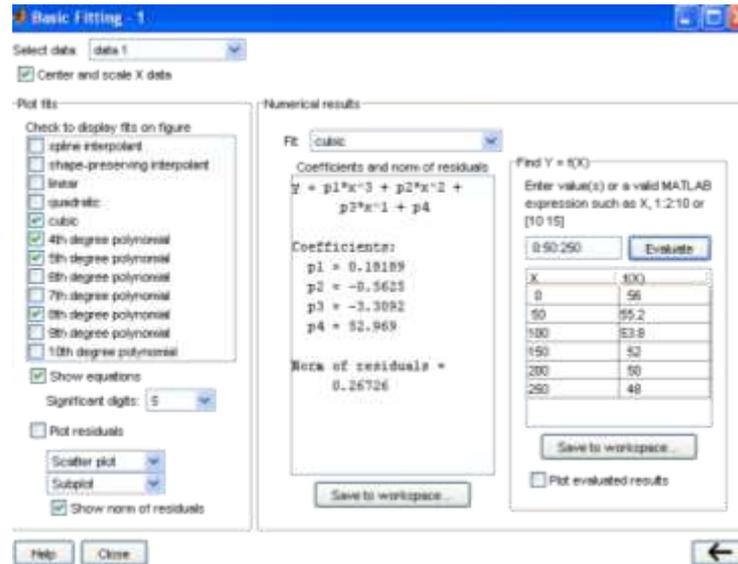


Рисунок Б.2 – Окно программы

2. Выбираем методы: *Кубическая, полиномиальная 4-й, 5-й и 8-й степеней* (рисунок Б.2). Ставим флажок в окне *Show equations (Показать уравнение)*. В поле графика появятся выражения, которые описывают полученные функции. Функции содержат коэффициенты полученного полинома. Для отображения ошибки аппроксимации необходимо установить флажок в окне *Plot residuals (Нанести остатки)* и из верхнего меню выбрать способ отображения ошибки (*Bar plot (Панель нанесения), Scatter plot (Разброс нанесения), Line plot (Линейное нанесение)*).

Результаты (график ошибки и качество) аппроксимация приведены на рисунке Б.4. Как видно из графика, наименьшая ошибка аппроксимации получается при использовании полинома 5-й степени. Однако с увеличением порядка полинома, ошибка начинает возрастать. Из графика видно, что при использовании полинома 8-й степени ошибка аппроксимации больше, чем при использовании полинома 4-й степени.

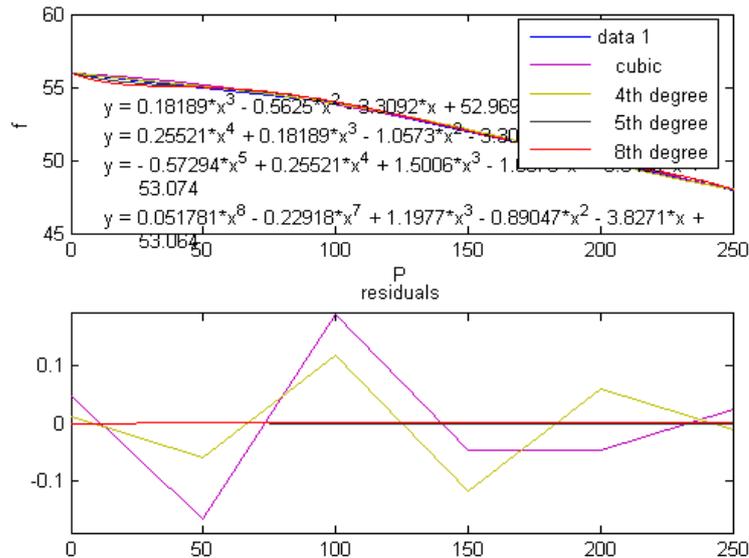


Рисунок Б.4 – График ошибки

В окне *Basic Fitting (Оборудование)* при нажатии в нижнем правом углу стрелки, появляется расширенное окно *Basic Fitting: Numerical results (Числовой результат)* – чисельный результат. В окне *Fit (Подгон)* устанавливаются типы аппроксимации, а в поле *Coeficients and norm of residuals (Коэффициент и образец остатка)* отображается функция аппроксимации, более точные коэффициенты полиномов и коэффициент ошибки.

3. Если в окне *Numerical results* нажать стрелку в нижнем углу, появится новое окно: *Find Y=f(X)* – найти функцию $Y=f(X)$. Окно дает возможность получить точки, которые соответствуют кривой графика.

В настоящее время предложены различные схемы классификации нейронных сетей и соответствующие алгоритмы их обучения. Одним из самых распространенных алгоритмов обучения является так называемый алгоритм обратного распространения ошибки. Аппроксимация кривой выполняется в пакете *Fuzzy Logic Toolbox* системы *MATLAB*, в котором реализованы гибридные нейронные сети *ANFIS*. При этом термы входных лингвистических переменных описываются стандартными функциями принадлежности, а термы выходной переменной представляются линейной или постоянной функцией принадлежности. С другой стороны, гибридная сеть *ANFIS* представляет собой систему нечеткого вывода

типа Сугено нулевого или первого порядка, в которой каждое из правил нечетких продукций имеет постоянный вес, равный 1.

Для создания гибридной сети необходимо загрузить данные. Файл с данными – обычный текстовый файл, в котором каждая строка представляет собой матрицу, в которой количество строк соответствует объему выборки, последний столбец – значению выходной переменной, а остальные столбцы – значениям входных переменных. На рисунке Б.5 представлен вид графического редактора адаптивных сетей после загрузки данных. Каждой строке данных соответствует отдельная точка графика, которая изображается кружком.

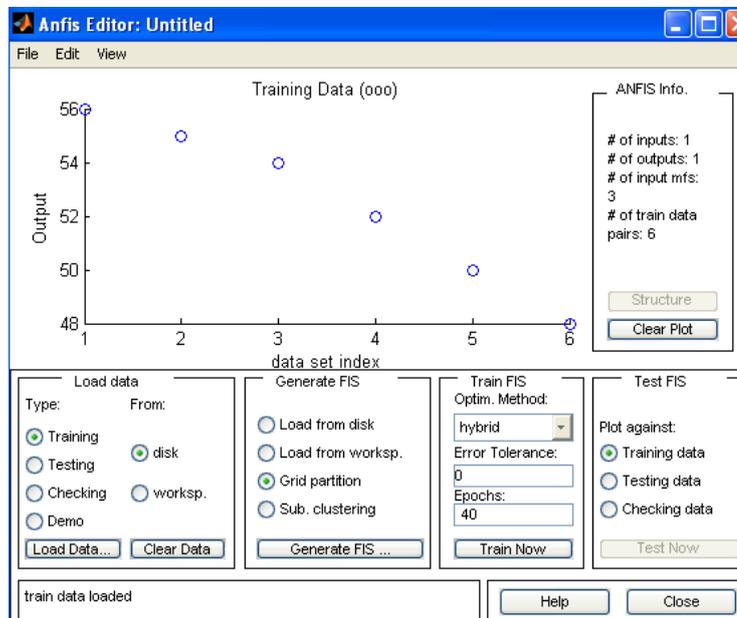


Рисунок Б.5 – Untitled

Для того чтобы сгенерировать структуру системы нечеткого вывода Сугено, которая является моделью гибридной сети, используется диалоговое окно, представленное на рисунке Б.6.

Для сравнения, аппроксимация кривой будет выполняться с использованием термов треугольной и гауссовской форм. Обучение сети выполняется гибридным методом, который представляет собой комбинацию метода наименьших квадратов и метода убывания обратного градиента.

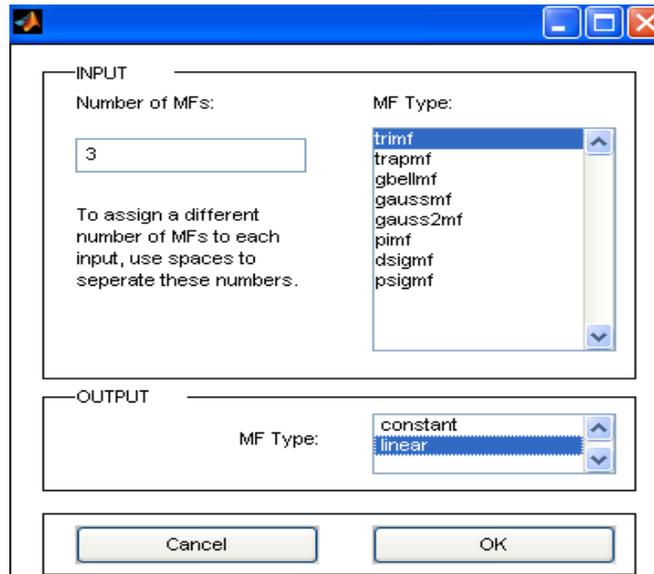


Рисунок Б.6 – Вывод Сугено

На рисунке Б.7 представлена структура нейронной сети. Для исследования построенной модели гибридной сети можно воспользоваться программой просмотра правил. Для получения интересующего воспользоваться программой просмотра правил. Для получения интересующего значения выходной переменной необходимо задать конкретное значение входной переменной. При этом, на графике функций принадлежности (рисунок Б.8) выходной переменной будет указано искомое значение.

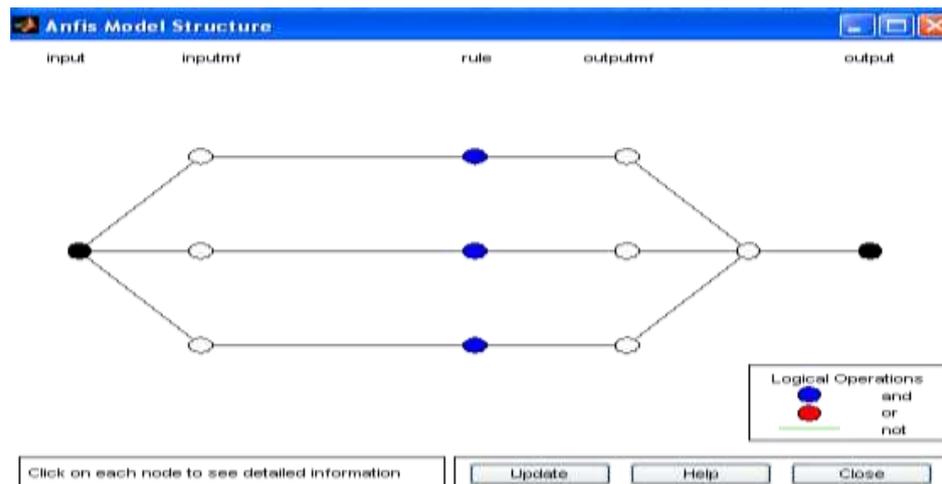


Рисунок Б.7 – Структура нейронной сети

Оценить значения выходной переменной можно посредством визуализации поверхности нечеткого вывода. Изображенная поверхность (для одной входной

переменной – график) может быть интерпретирована как график функциональной зависимости выходной переменной от входной (рисунок Б.9).

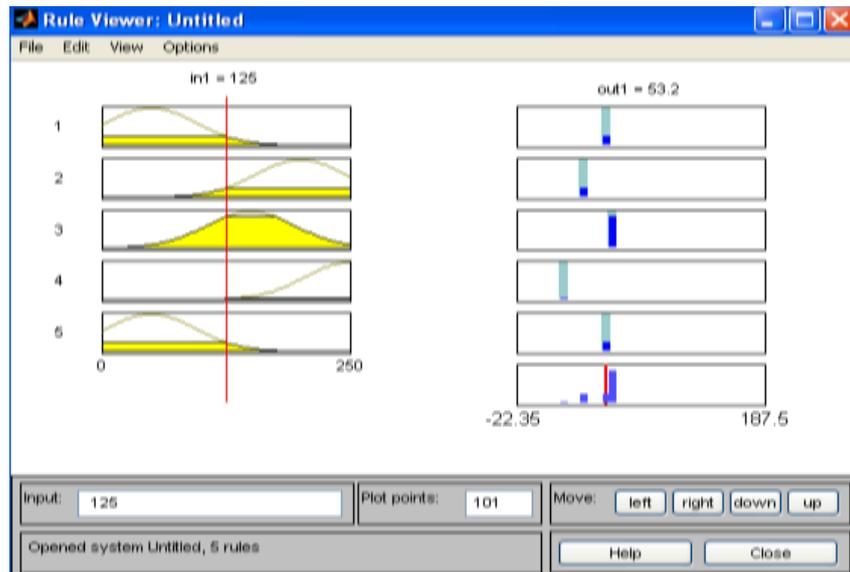


Рисунок Б.8 – Функции принадлежности

Следует отметить, что в случае недостаточной информации обучающих данных использование гибридных сетей может оказаться вообще нецелесообразным, поскольку получить адекватную нечеткую модель, а значит – и точный прогноз значений выходной переменной не представляется возможным. Разработанная модель гибридной нейронной сети может быть использована при моделировании энергетических систем с ГД.

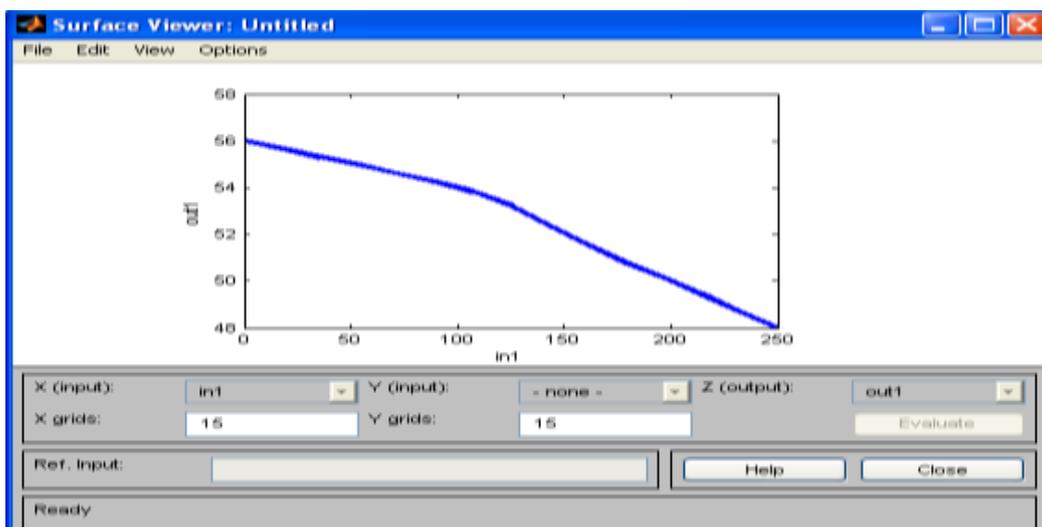


Рисунок Б.9 – График функциональной зависимости