

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

ЗИНЧЕНКО АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ

Номинация: «Отраслевые технологии»

**«Улучшение показателей нестационарных режимов работы морской
техники с использованием регулятора нечеткой логики для флота
Республики Крым»**

Научная работа
для участия в конкурсе
на соискание премии
Республики Крым «За научные
достижения в сфере
приоритетных направлений
развития Крыма»
Магистранта 2 курса
Факультета Морской

Керчь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ.....	7
1.1 ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ.....	7
1.2 ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДГ	10
1.3 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПАРАЛЛЕЛЬНО	20
РАБОТАЮЩИХ ГА	20
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	23
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГДГА	24
2.1 МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГДГА.....	24
2.2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГДГА	26
2.3 ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ГЕНЕРАТОРАМИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ	30
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	32
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ	33
ВРАЩЕНИЯ ГДГА.....	33
3.1 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ.....	33
3.2 АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ГДГА... ..	38
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	44
РАЗДЕЛ 4 РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГДГА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА.....	46
4.1 УПРАВЛЕНИЕ ГДГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА	46
4.2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГД.....	52
4.3 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГДГА.....	56
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4	59

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	62
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	63

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Судостроение является одним из ключевых направлений промышленности как для крымского полуострова, в частности, так и для Российской Федерации, и является важнейшей структурной составляющей экономики, поскольку вовлекает в экономический оборот предприятия других отраслей. Развитие экономики судостроения для России носит стратегически важный характер, поскольку отрасль не только дает возможность генерировать экспортные поставки высококачественной и конкурентоспособной продукции, тем самым формируя новые денежные потоки в экономику государства, но и обладает синергией со смежными отраслями, обеспечивая рабочими местами профильных специалистов из других отраслей промышленности. Существенные ограничения в импорте технологий и оборудования, а также курс на импортозамещение, который принят в России с 2014 года, стали определенным стимулом для развития отечественной промышленности, и, соответственно, экономики. Тем не менее, на сегодняшний день нельзя утверждать, что российская промышленность полностью адаптировалась под сформированные геополитической обстановкой условия, а ее экономика является эффективной. Вошедшие в состав России весной 2014 г. Республика Крым и г. Севастополь находятся в активной стадии интеграции. С учетом специфики географического положения крымского полуострова, судостроение исторически является его ключевой отраслью экономики. Санкционный режим, в условиях которого развивается российская экономика с 2014 года, накладывает ряд ограничений и на крымскую промышленность, что в определенной степени замедляет экономическое развитие. Применение технологии искусственного интеллекта и внедрение его в отрасль позволило повысить конкурентоспособность как проектируемого судна так и выполнение ремонтных работ по замещению и модернизации судов.

К настоящему времени газодизель-генераторные агрегаты (ГДГА) активно внедряются в состав электростанций, где достаточна их одиночная работа, то есть они нашли применение в качестве одиночных систем автономного электроснабжения. Однако ввиду значительных колебаний частоты вращения ГД при изменении нагрузки на ГДГА и параллельной работе, в системе возникают колебательные процессы, существенно влияющие на рабочие характеристики агрегатов. Использование для стабилизации частоты вращения ГДГА микропроцессорных систем и ПИД-регуляторов не позволяет полностью решить проблему повышения качества стабилизации частоты вращения в широком диапазоне изменения динамических нагрузок. Автоматическое регулирование СЭУ и совершенствование переходных процессов рассматривались в работах д.т.н., профессоров Крутова В.И., Сахарова В.В., Овсянникова М.К., Петухова В.А., Шадрина А.Б. Для устранения этого недостатка требуется изучение рабочих режимов ГДГА на основе натуральных экспериментов, выполненных с использованием различных сортов газового топлива и их смесей. С этой целью необходимо разработать аппаратно-программные средства для стабилизации скоростных режимов ГД, а также создать системы управления, обеспечивающие требуемые динамические качества параллельной работы ГДГА. Это позволит повысить экономичность применения ГДГА на конкретных объектах и комплексах ГДГА с питанием попутных газов, получаемых в период выполнения буровых работ. Моделированию процессов и диагностике СЭУ посвящены исследования д.т.н., профессора Мясникова Ю.Н.

Объектом исследования является ГДГА работающий на различных сортах газового топлива с системой управления нового типа, которые применяются в акватории Республики Крым.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на основе современной теории ДВС, математического аппарата нечеткой логики инструментария вычислительной среды Matlab и ее приложений, теории экспериментальных исследований и методов проведения машинного эксперимента с учетом требований отечественных и международных стандартов на проведение испытаний двигателей внутреннего сгорания.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований исследованы в организации: в ГУП «Черноморнефтегаз», ООО «Институт «Шельф», паром «Олимпиада», АО «ЦКБ «Коралл».

Основные выводы и положения работы используются в учебном процессе и научной работе на кафедрах электрооборудования судов и автоматизации производства и судовых энергетических установок в ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» при проведении практических занятий.

Апробация результатов исследований. Основные теоретические положения и результаты диссертации докладывались и получили положительную оценку на 10 международных конференциях.

Представлено одно свидетельство программы на ЭВМ.

Публикации. По теме работы опубликовано 14 работ, в том числе в 10 публикациях, вошедших в перечень, рекомендованный ВАК РФ.

РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

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.

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

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

– схема "станция – шины" неизменного напряжения и частоты с простой связью (рисунок 1.1, *a*), 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_π , 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).

Как известно, в автономных условиях реактивное сопротивление линии передач мало и может быть принято по отношению к сопротивлению x_d генератора равным нулю. В этом случае отдаваемую генератором активную мощность можно определить по известной формуле:

$$P_1 = \frac{E_d u}{x_d} \sin \delta_1,$$

где E_d – э. д. с. генератора, приложенная за x_d ; δ_1 – угол между э. д. с. E_d и напряжением u сети бесконечной мощности.

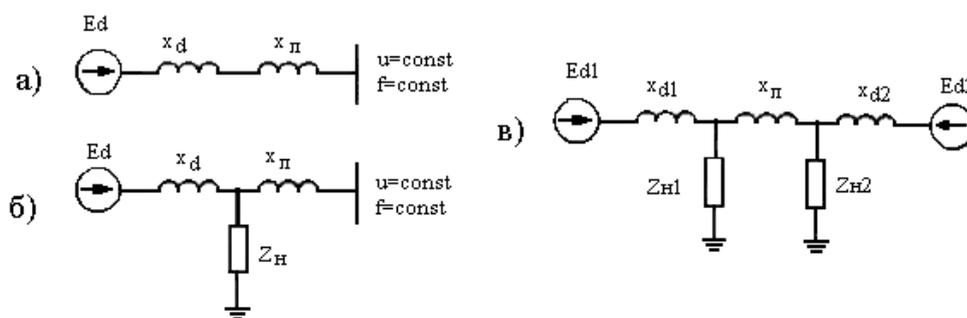


Рисунок 1.1 – Схемы подключения генераторов

Как показано в работах [22, 25, 35, 36, 37], при передаче номинальной нагрузки угол $\delta_{ном}$ в этих условиях (при $x_\pi = 0$) составляет 10 – 25°.

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

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

$$k_{c1} = \frac{P_{1пред} - P_{1ном}}{P_{1ном}} = \frac{P_{1пред}}{P_{1ном}} - 1 = \frac{E_d u x_d}{x_d E_d u \sin \delta_{1ном}} - 1 = \frac{1}{\sin(25 \div 10)^0} - 1 = 1,36 \div 4,7. \quad (1.1)$$

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 фор-

сировки 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.

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

- свободные колебания, обусловленные действием систем автоматического регулирования и неперiodическими 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.

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.

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].

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 [1-11, 12]. Практика исследования и проектирования указывает на недостаточное использование для совершенствования конструкции РЧВ непрямого действия методов математического программирования и оптимизации.

1.2.2 Двигатель внутреннего сгорания как объект регулирования

Динамические свойства комбинированного двигателя, как регулируемого объекта интенсивно изучались в [3, 18, 29, 39, 41-44]. Статические и динамические свойства САР двигателя определяются свойствами ее элементов: двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и автоматического регулятора. 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

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

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:

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

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 аperiodического звена:

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

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

$$F_d = \left(\left. \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \Delta\Omega - \left. \frac{\partial M_{Л}}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \right) \Delta\Omega - \text{фактор устойчивости;}$$

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

зочного воздействия.

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

Если воспользоваться более удобными для расчета величинами:

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

где GD^2 – маховой момент двигателя, $\text{кГ}\cdot\text{м}^2$; n_N – номинальное число оборотов двигателя, об/мин; N_{eN} – номинальная мощность двигателя, л. с;

то номинальное время разгона будет равно:

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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 ;

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

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:

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

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

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

где φ – безразмерное изменение угловой скорости коленчатого вала; q – безразмерное изменение цикловой подачи топлива; ρ – безразмерное изменение давления наддува; $\alpha_{\text{д}}$ – 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:

$$T = \frac{j\omega_0}{\frac{\partial M}{\partial g_{и}} g_{и0}},$$

безразмерный коэффициент k называют коэффициентом самовыравнивания двигателя:

$$k = \frac{F\omega_0}{\frac{\partial M}{\partial g_{и}} g_{и0}},$$

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

Дизель, снабженный турбонаддувом, в установившихся режимах работает при вполне определенных коэффициентах избытка воздуха α и развивает мощность, соответствующую подобранному давлению наддува p_k . Число оборотов турбоагнетателей, не связанных жестким приводом с коленчатым валом дизеля, и давление наддува зависят от развиваемой дизелем мощности.

Системы автоматического регулирования турбонаддува ДВС, как и любые другие САР, являются нелинейными. Поэтому в общем случае их следует описывать нелинейными дифференциальными уравнениями. Расчетные и экспериментальные исследования САР турбонаддува ДВС показывают, что возможно описание динамических качеств этих систем с достаточной для инженерных расчетов точностью линейными дифференциальными уравнениями с тем, однако, условием, что наиболее существенные нелинейности должны быть учтены. К числу та-

ких нелинейностей следует отнести люфты в кинематике привода регулируемого устройства и ограничение выходной координаты исполнительного механизма.

1.3 Методы и устройства распределения нагрузок параллельно работающих ГА

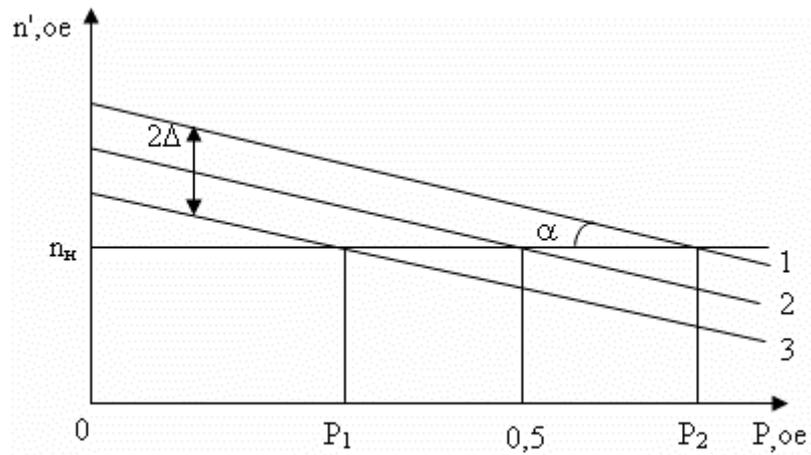
Опыт испытаний и эксплуатации электроэнергетических систем показывает, что при параллельной работе ГА в отдельных режимах в большей или меньшей степени проявляется неустойчивость в виде незатухающих колебаний роторов. При этом обменные колебания мощности между ГА достигают больших амплитуд и в ряде случаев остаются неустраняемыми.

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

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 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 работающим 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 $\operatorname{tg} \alpha = \delta$ 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 v_p получается заниженным при малых нагрузках системы и завышенной – при больших нагрузках системы.

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

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].

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.

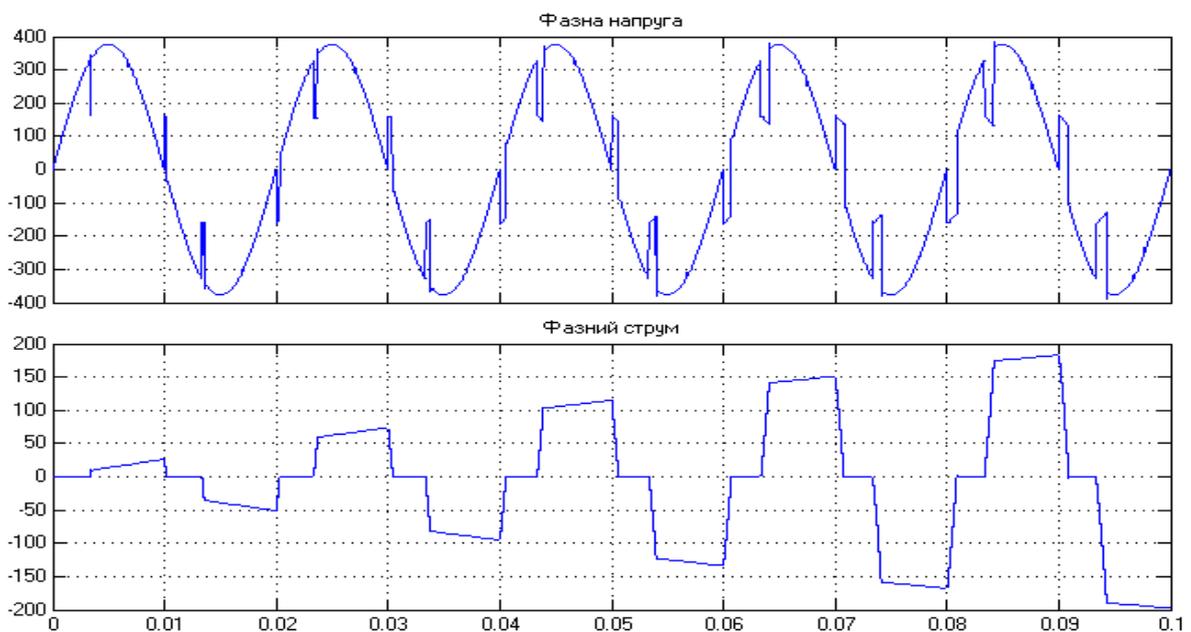


Рисунок 1.3 – Результат моделирования в среде MATLAB режима пуска двигателя постоянного тока, питающегося от генератора соизмеримой мощности через управляемый выпрямитель

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 режима пуска двигателя постоянного тока, питающегося от генератора соизмеримой мощности через управляемый выпрямитель.

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. Системы, обеспечивающие параллельную работу дизель-генераторных агрегатов рассчитаны лишь на устранение неравенства статических характеристик дизель-генераторных агрегатов и малопригодны при наличии собственных колебательных процессов в каждой машине. Это приводит к необходимости более детальных исследований в этом направлении и разработки более эффективных систем, обеспечивающих пропорциональное распределение активной мощности между дизель-генераторными агрегатами.

РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГДГА

2.1 Методы изучения динамических свойств ГДГА

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].

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

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_{enom} , и экспериментально определенным временем пуска (время разгонки) $T_{\text{пр}}$, определяется момент инерции ДГ исходя из соотношений [33, 75, 85]:

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

Номинальный вращательный момент дизеля равняется:

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

Средний эффективный вращательный момент двигателя за время разгонка:

$$M_{\text{еср}} \cong 0.95 M_{\text{еном}}.$$

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

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

Приведенные формулы используются для уточнения расчетного значения момента инерции двигателя $J_{\text{д}}$ и генератора $J_{\text{г}}$.

Момент инерции двигателя связан с моментом инерции маховика приближенным соотношением:

$$I_{\text{д}} \approx (1.2 \div 1.3)I_{\text{м}}; \quad J_{\text{м}} = \frac{mD_{\text{м}}^2}{2}; \quad J_{\text{г}} = \frac{mD_{\text{г}}^2}{4}.$$

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:

$$J_{\text{д}} \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{\text{нр1}}} = M_{\text{е}}; \quad (J_{\text{д}} + J_{\text{г}}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{\text{нр2}}} = M_{\text{е}}.$$

Приравнивая левые части формул, получаем:

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

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 $\Delta\Omega \leq 0.02 \Omega_{уст}$.

2.2 Идентификация статических характеристик ГДГА

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]. 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.

Исследования, проведенные рядом авторов [17, 34] 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:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{ij}x_ix_j, \quad (2.2)$$

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

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 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

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.

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

2.2.3 Автоматизация обработки результатов измерений напряжения для идентификации статических характеристик ГДГА

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 опреде-

литель, какой из них больше и это значение записать в массив. После этого с помощью интерполирующего фильтра получить массив значений, который соответствует огибающей [8,9]. 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 отчетов 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.

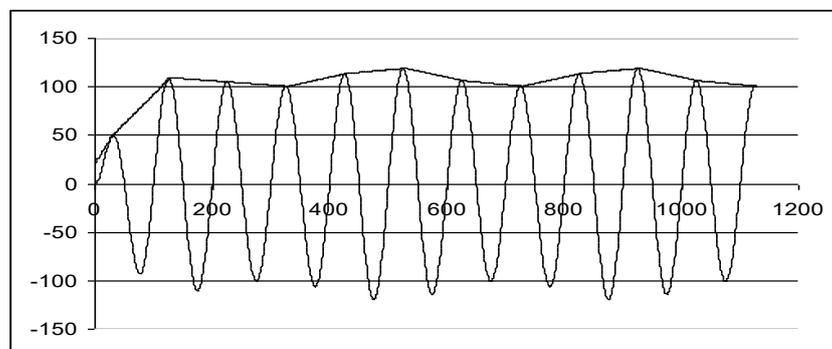


Рисунок 2.1 – График измеренного напряжения его огибающая

При измерении частоты напряжения возникает трудность, связанная с нестабильностью частоты аналого-цифрового преобразования. В течении некоторого числа периодов погрешность накапливается и в результате возникает ошибка в определении частоты на одном периоде

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.

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

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

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 v_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:

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

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 .

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.

4. На основе результатов экспериментальных исследований установлено, что колебания оборотов ГД носят нестационарный характер и имеют разбросы, которые не позволяют им работать параллельно с аналогичными агрегатами из-за недопустимо больших обменных колебаний активной мощности.

РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГДГА

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.

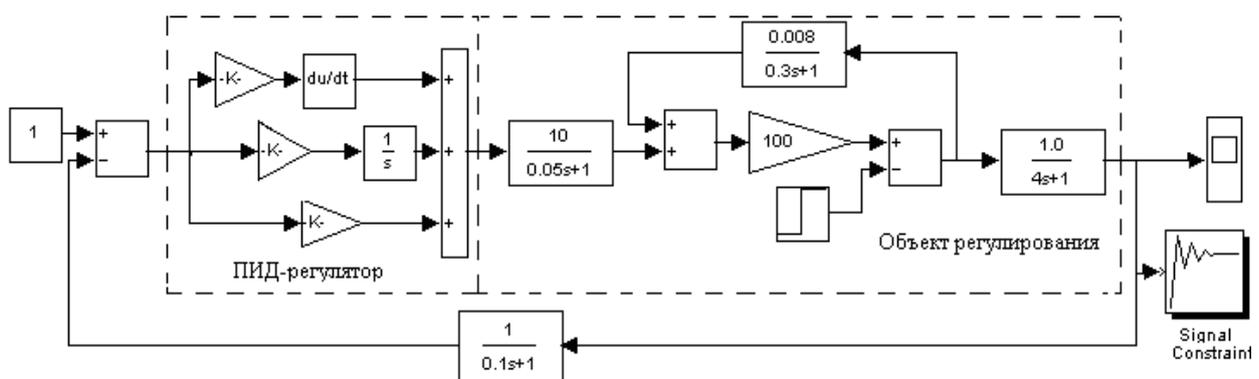


Рисунок 3.1 – Динамическая модель ГД

По отношению к ПИД-регулятору, ГД является объектом регулирования. Динамические свойства объекта регулирования по управляющему и возмущаю-

щему воздействию характеризуются кривой переходного процесса и отражают колебательный характер процессов с собственной частотой ω_0 и коэффициентом колебательности m_0 .

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 $W_{oc} = 1$:

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

Из полученного комплексного уравнения могут быть получены следующие расчетные формулы:

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

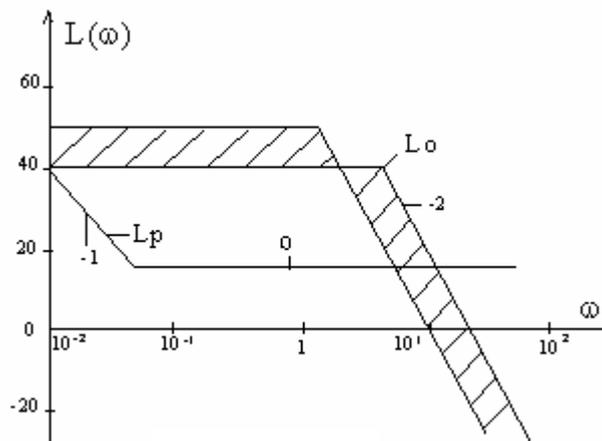


Рисунок 3.2 – ЛАЧХ разомкнутой исследуемой системы

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; $\varphi_0 = \text{arctg}(\text{Im}_0(m_0\omega)) / \text{Re}_0(m_0\omega)$ – 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 $W_p = k_p$.

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.

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 :

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

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.

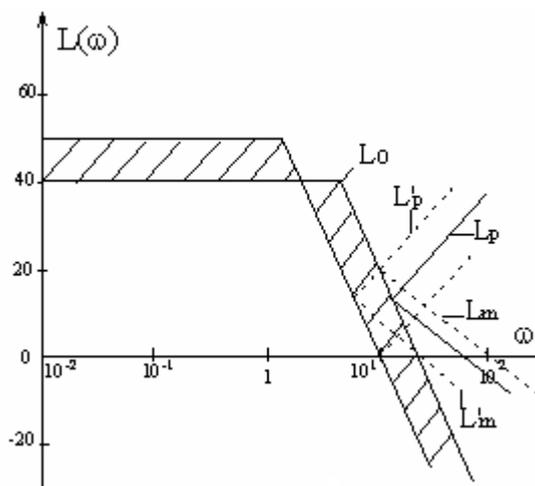


Рисунок 3.3 – Желаемая ЛАЧХ системы

Для 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.

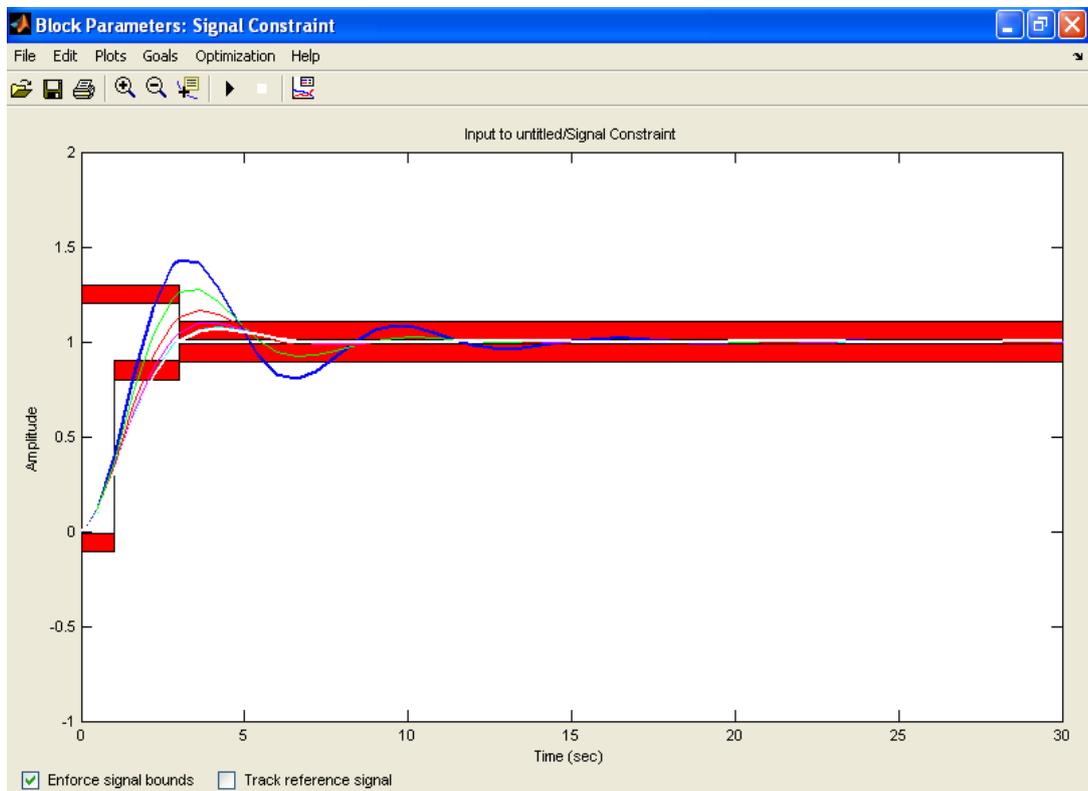


Рисунок 3.4 – Окно подбора параметров

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.

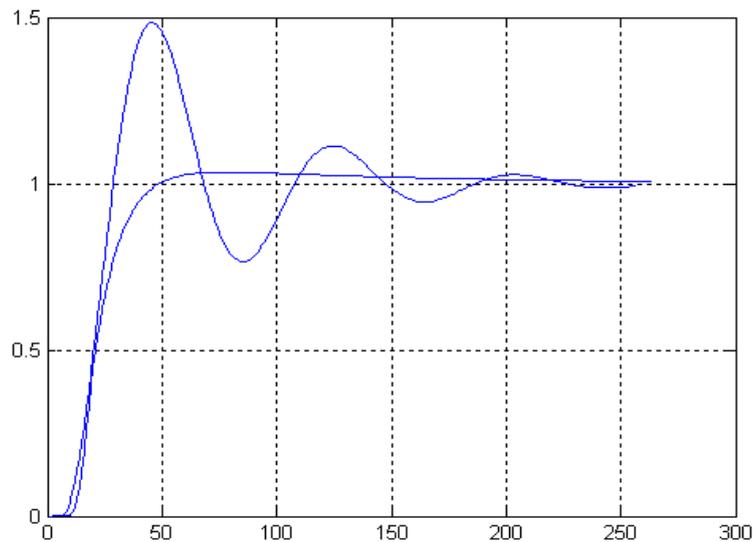


Рисунок 3.5 – Переходные процессы в системе

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.

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	Kp	Ki	Kd
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 [13-15].

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

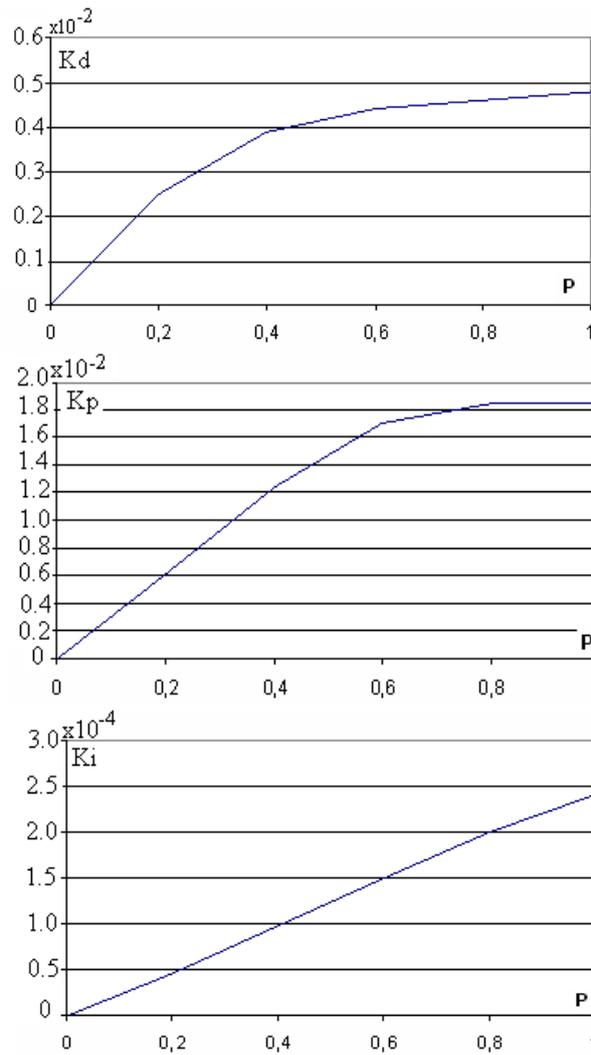


Рисунок 3.6 – Зависимости оптимальных значений коэффициентов регулятора в зависимости от мощности ГДГА

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:

$$P = \frac{P_n}{P_d},$$

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

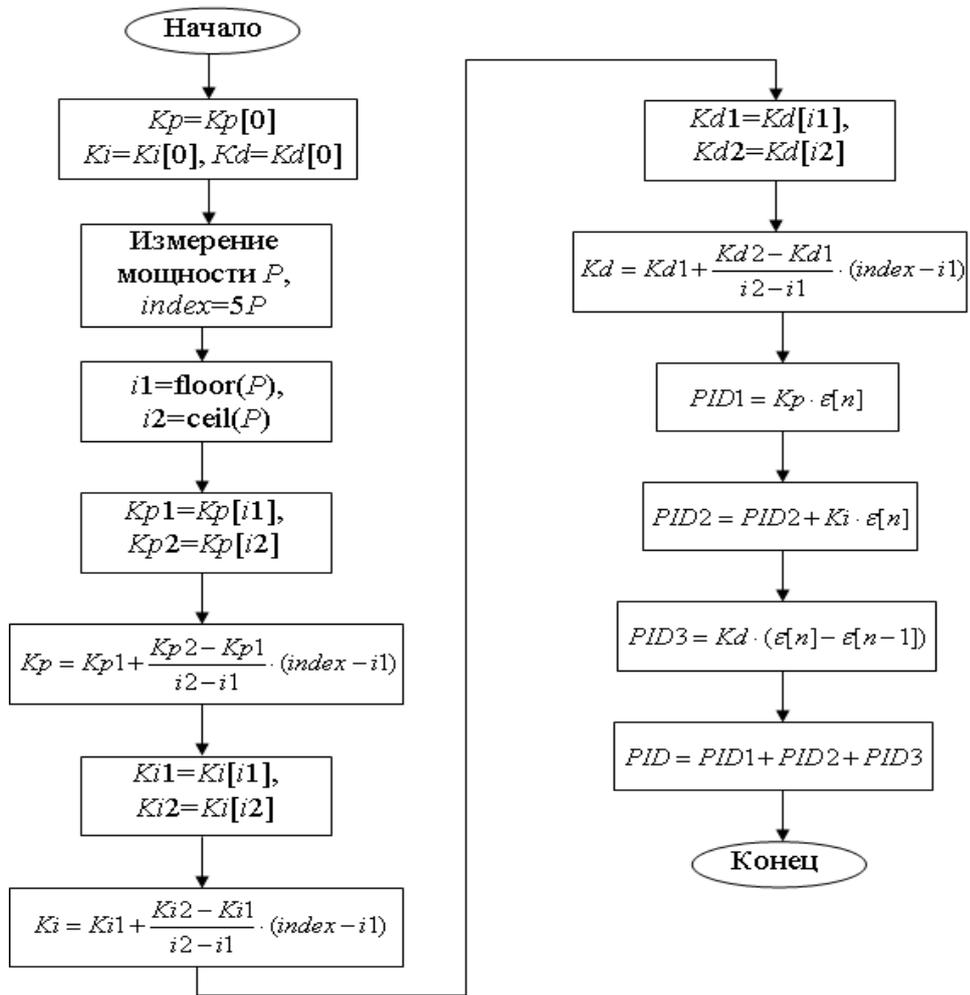


Рисунок 3.7 – Алгоритм корректировки параметров ПИД-регулятора

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.

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.

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.

Для оценки качества регулирования при ступенчатом входном воздействии обычно используют интегральные критерии, учитывающие площадь на интервале времени t_p , ограниченную графиком переходного процесса $y(t)$.

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:

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

где p – вектор настраиваемых параметров.

Интегральный критерий может быть записан в виде:

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

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:

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

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

На рисунке 3.8 представлена структурная схема цифрового ПИД-регулятора. Через Z^{-1} обозначен блок задержки сигнала на один период квантования.

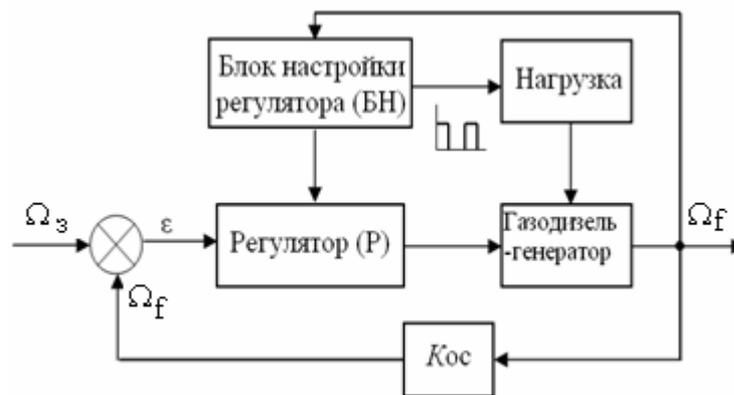


Рисунок 3.8 – Структурная схема регулятора с самонастройкой

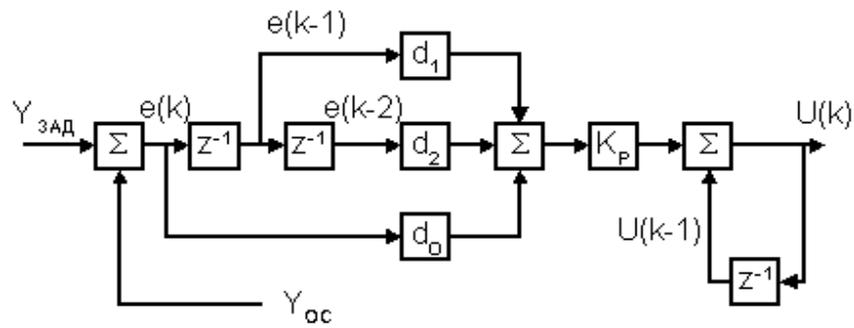


Рисунок 3.8 – Структурная схема цифрового ПИД-регулятора

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 %. В основе работы алгоритма лежит методика настройки ПИД-регуляторов Зиглера-Николса.

Выводы по разделу 3

1. Анализ работы АЭС 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.

4. 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.

РАЗДЕЛ 4 РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГДГА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

4.1 Управление ГДГА 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. 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.

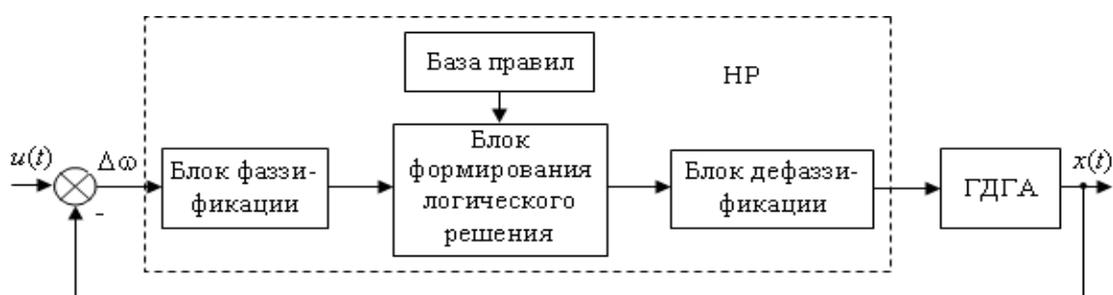


Рисунок 4.1 – Функциональная схема системы автоматического управления

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.

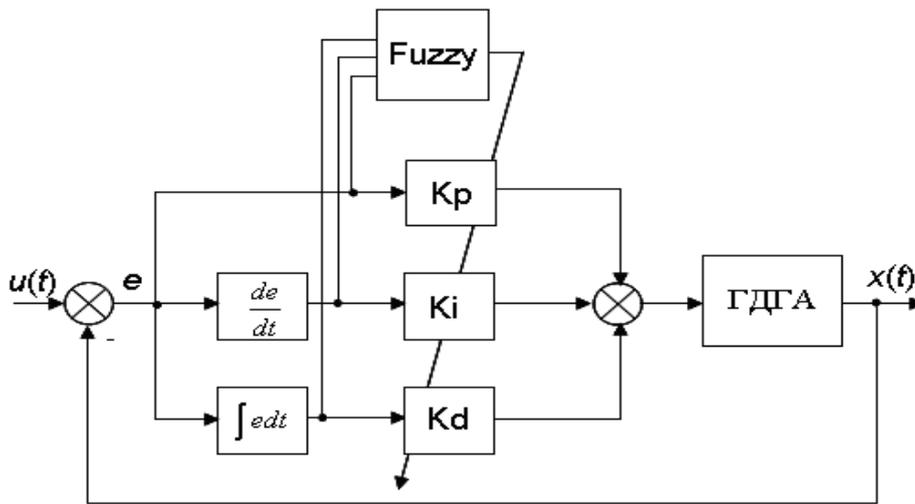
В блоке дефаззификации полученная результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на объект управления преобразуется в числовую величину, как правило, методом определения «центра тяжести» плоскости результирующей фигуры, лежащей под графиком результирующей функции принадлежности. Общее 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:

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

При реализации регулятора с использованием нечеткой логики на микропроцессоре удобно выбирать трапециевидные 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.

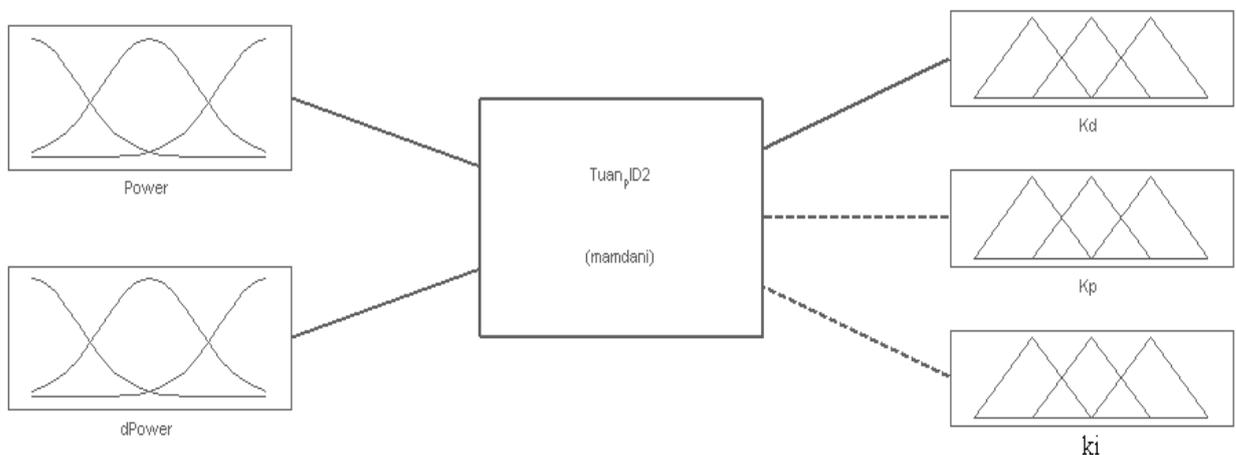


Рисунок 4.3 – Структура регулятора

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».

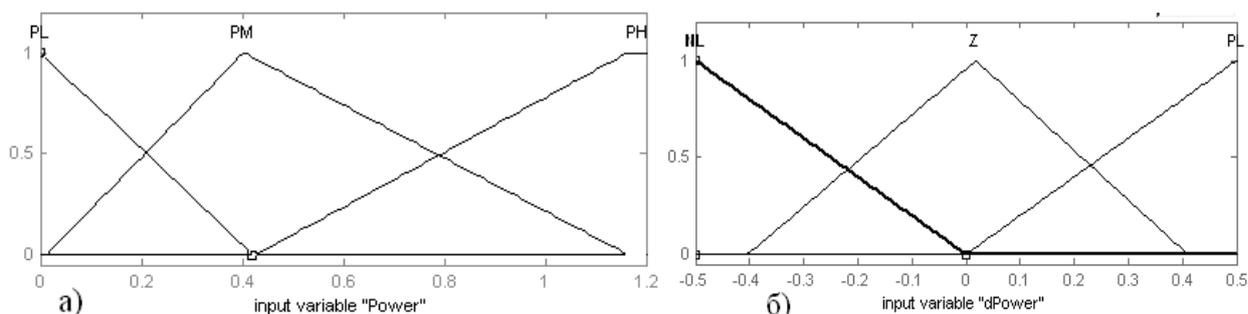


Рисунок 4.4 – Функции принадлежности регулятора

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.

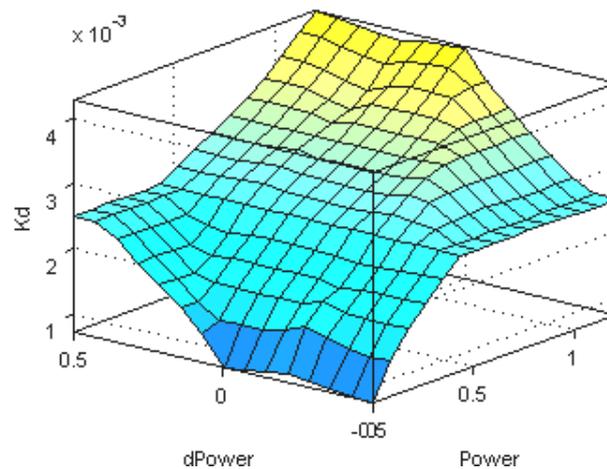


Рисунок 4.5 – Зависимость коэффициента дифференциального звена регулятора в зависимости от значений на входе нечеткого регулятора

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

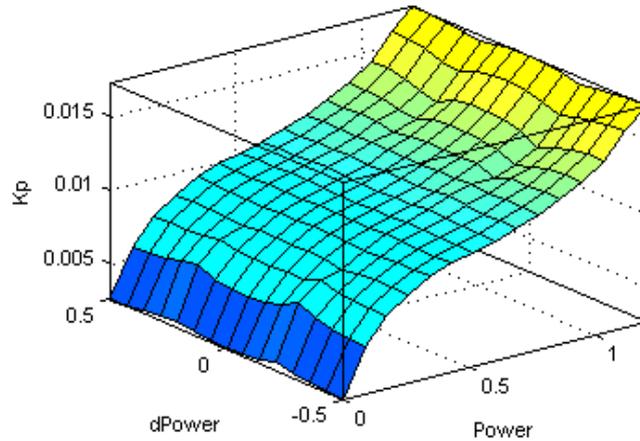


Рисунок 4.6 – Поверхность нечёткого вывода для коэффициента K_p

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

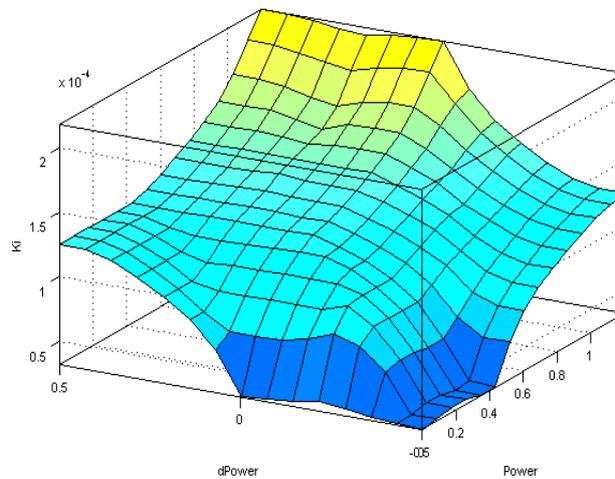


Рисунок 4.7 – Поверхность нечёткого вывода для коэффициента K_i

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).

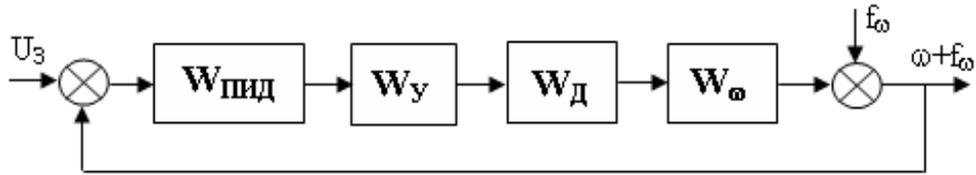


Рисунок 4.8 – Структурная схема ГД

где

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

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

находим уровень помехи на выходе замкнутой системы $f_{\omega\text{з}}$

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

Спектральная плотность помехи на выходе замкнутой системы

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

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

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

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

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

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

где $a_3 = T_n T_d T_{TH}$; $a_2 = T_n T_g + K_n T_n T_{TH}$; $a_1 = K_n T_n + T_{TH}$;

$b_3 = \frac{T_y T_g T_{TH}}{D(1 - K_{TH} K_d)}$; $b_2 = T_y \frac{T_g}{D} + \frac{T_y T_{TH}}{1 - K_{TH} K_d} + \frac{T_g T_{TH}}{D(1 - K_{TH} K_d)}$; $b_1 = T_y + \frac{T_g}{D} + \frac{T_{TH}}{1 - K_{TH} K_d}$.

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 эф-

эффективности подавления помехи f_ω в оборотах дизеля можно W_k приближения в виде:

$$W_k \approx \frac{K_y K_D}{D(1 - K_D T_{TH})} \cdot \frac{1}{T_n p} = \frac{K_\Theta}{T_n p}.$$

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 $\left(\frac{T_n}{K_\Theta}\right)^2 \omega^2 \gg 1$, $W_3(j\omega) = 1$, то на спектр выходного

параметра влияет лишь низкочастотный диапазон, для которого:

$$W_3(j\omega) = \left(\frac{T_n}{K_\Theta}\right)^2 \omega^2.$$

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

$$R_{\text{ВЫХ}}(0) = \sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_n}{K_\Theta}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_{Bx}^2 \alpha}{\omega^2 + \alpha^2} \cdot \frac{d\omega}{\omega^2} = \left(\frac{T_n \cdot \sigma_{Bx}}{\sqrt{2} \cdot K_\Theta \cdot \alpha}\right)^2.$$

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 ГДГА

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.

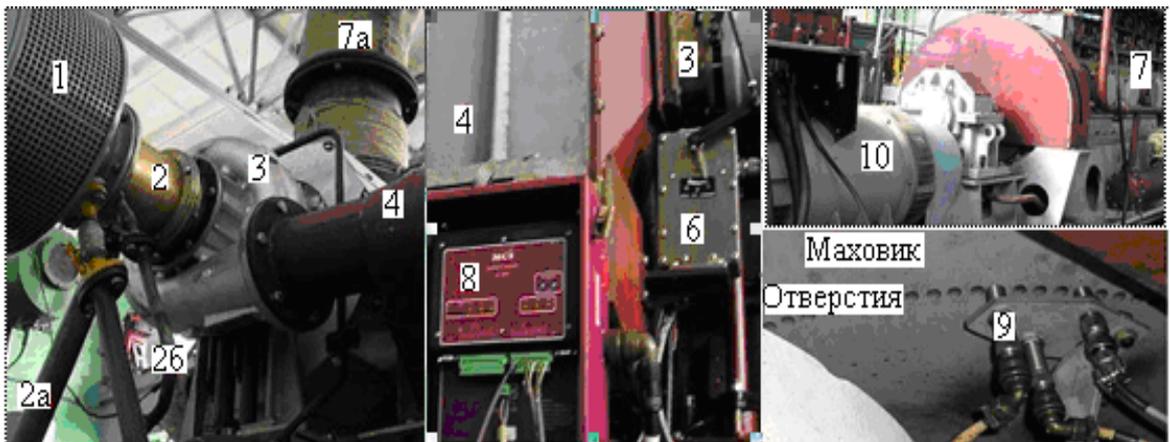


Рисунок 4.9 – Элементы ГДГА

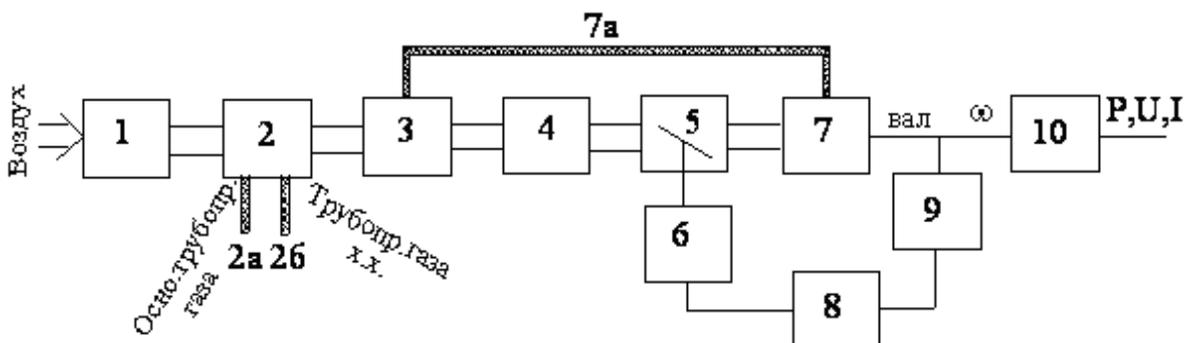


Рисунок 4.10 – Функциональная схема экспериментального комплекса

Воздушный поток через воздушный фильтр 1 (рисунок 4.10) подается в смеситель 2, к которому подводятся 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 газоздушная смесь отбирается турбо-нагнетателем 3, с выхода которого, через охладитель 4 и регулирующую 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 выполнения 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 СОМ – 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.

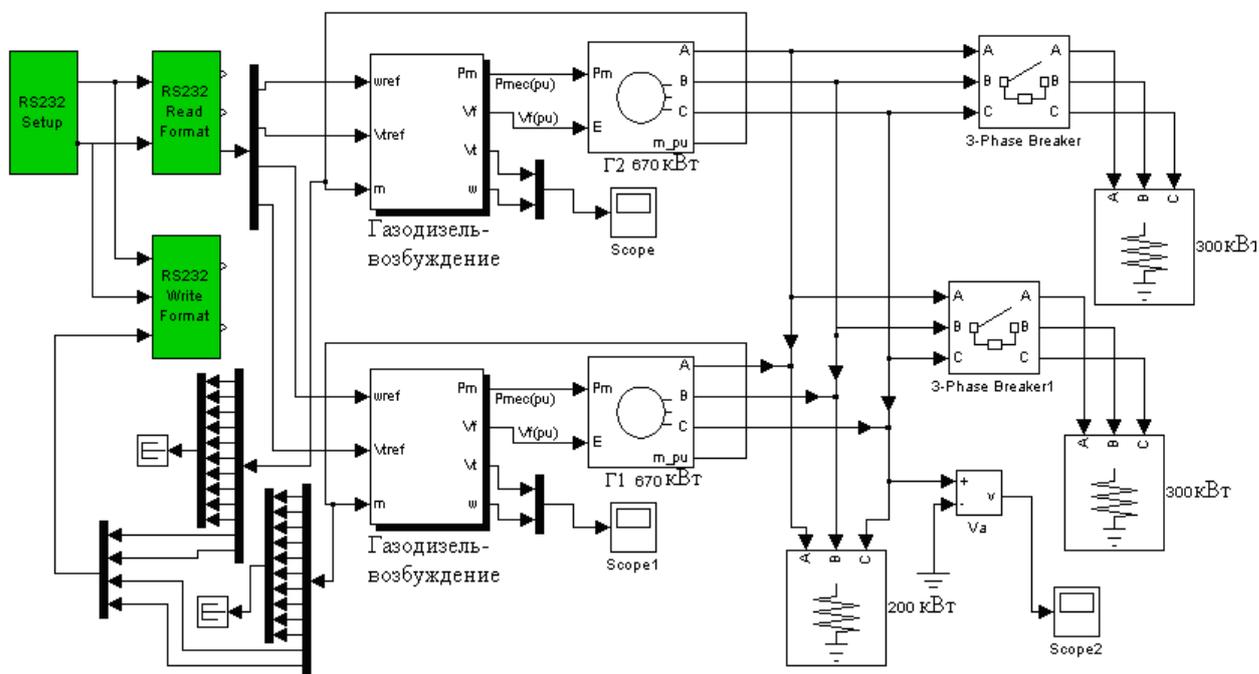


Рисунок 4.11 – Модель автономной электростанции с двумя ГДГА

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.

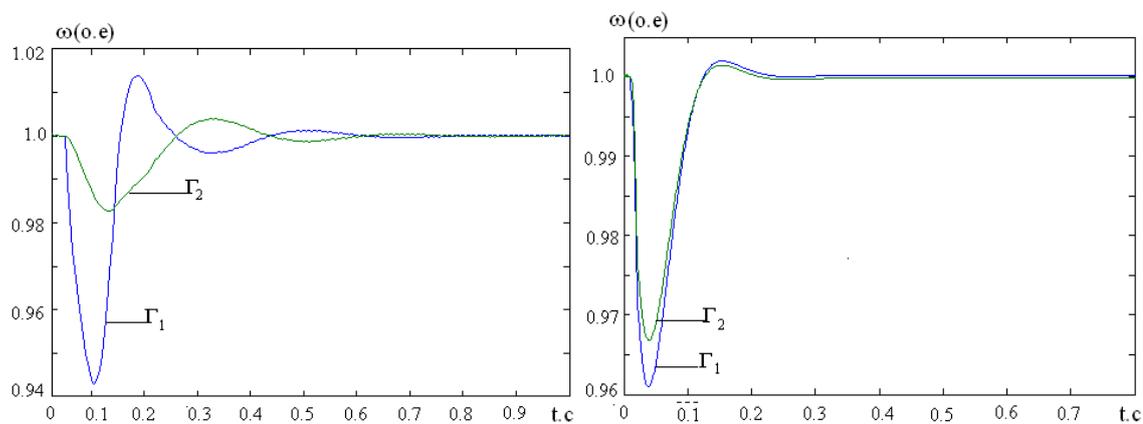


Рисунок 4.12 – Стабилизация оборотов ГДГА: а – без нечёткого регулятора; б – с нечётким регулятором

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.

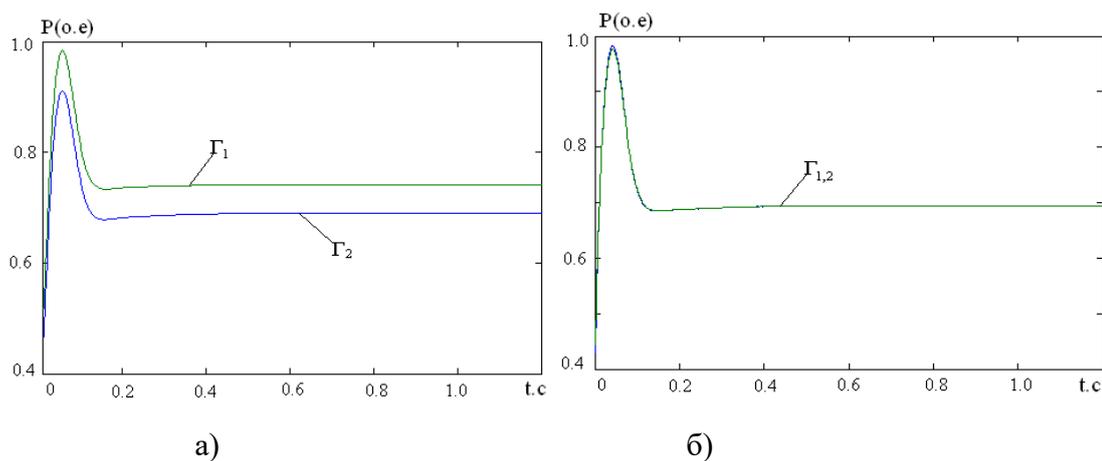


Рисунок 4.13 – Результат исследования переходного в ГДГА: а – без нечёткого регулятора; б – с нечётким регулятором

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.

Выводы по разделу 4

Анализ работы АЭЭС 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.

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

На основе нечеткой логики разработана структура ПИД-регулятора ГДГА, реализованная на основе микроконтроллеров, позволяющая корректировать его параметры в функции текущего режима, обеспечивая адаптацию ГДГА к величине его нагрузки и необходимую «грубость» в управлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ существующих методов распределения активной мощности параллельно работающих дизель-генераторов и систем распределения активной мощности между генераторными агрегатами. Выделены перспективные пути повышения качества распределения активной мощности между ГДГА.

Проведены исследования динамических свойств ГДГА при различных нагрузках. Разработана динамическая модель ГДГА, позволяющая исследовать его реакцию на изменяющуюся нагрузку со стороны генератора с учетом влияния турбокомпрессора ГД.

Разработана методика идентификации оптимальных параметров ПИД-регулятора ГДГА при различных нагрузках, обеспечивающих апериодический переходный процесс.

Разработан нечёткий регулятор оборотов ГДГА с автоматической идентификацией оптимальных с точки зрения качества переходного процесса параметров регулятора.

Таким образом, натурные испытания показали, что разработанные методы и средства автоматического управления и регулирования параллельно работающими ГДГА повышают стабильность их оборотов и точность пропорционального распределения отдаваемой ими мощности, обеспечивая возможность эффективной и безопасной работы ГДГА в параллель в составе автономных объектов морского транспорта.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРВ	– автоматический регулятор возбуждения;
АРН	– автоматический регулятор напряжения;
АРЧ	– автоматический регулятор частоты;
АЭС	– автономная электростанция;
АЭЭС	– автономная электроэнергетическая система;
БП	– буровая платформа;
БУ	– буровая установка;
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;
СПБУ	– самоподъемная буровая установка;
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. 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.
20. 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.
21. 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.

22. Васильев, М. В. Определение динамических свойств судовых дизельных установок в условиях нормальной эксплуатации / М. В. Васильев // Вестник МГТУ. – 2006. – №9(2). – С. 301–303.
23. Вейц, В. Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. – 383 с.
24. Веников, В. А. Кибернетические модели электрических систем / В. А. Веников. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 328 с.
25. Веретенников, Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы / Л. П. Веретенников. – Л.: Судостроение, 1975. – 376 с.
26. Веретенников, Л. П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей / Л. П. Веретенников. – Л.: Ленинград, 1982. – 626 с.
27. 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.
28. 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.
29. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.
30. Горелик, Г. Б. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками / Г. Б. Горелик. – Хабаровск: Изд-во, 2001. – 21 с.
31. Горелик, Г. Б. Автоматизированные системы управления судовых энергетических установок / Г. Б. Горелик. – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос. техн. унта, 1999. – 36 с.
32. Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К.: Радиоаматор, 2003. – 512 с.

33. Долгих, И. Д. Принципы согласования параметров при синтезе микропроцессорных САР частоты вращения дизеля/двигателя внутреннего сгорания / И. Д. Долгих, П. П. Петров. – 1982. – Вып. 46. – С. 92–97.
34. 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.
35. Дьяконов В. П., Круглов В. И. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / В. П. Дьяконов, В. И. Круглов. – Питер, 2003. – 448 с.
36. Дьяконов, В. П. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. И. Круглов. – СПб.: Санкт-Петербург, 2001. – 480 с.
37. Дьяконов, В. П. Справочник по применению системы PC MatLAB / В. П. Дьяконов. – М.: Наука, Физматлит, 1993. – 112 с.
38. Жадобин, Н. Е. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики / Н. Е. Жадобин, А. П. Крылов, В. А. Малышев. – Санкт-Петербург ЭЛМОР, 1998. – 439 с.
39. Железняк, А. А. Методы анализа нечетких стохастических процессов судовой электроэнергетической системы газодизельных двигателей / А. А. Железняк, И. Л. Титов, А. С. Бордюг // Рыбное хозяйство . – 2016. – № 3. – С. 85–88.
40. 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.
41. 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.
42. 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 государ-

- ственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 4 (32). – С. 198–207.
43. 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.
 44. 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.
 45. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 415 с.
 46. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 145 с.
 47. Крутов, В. И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Наука, 1980. – 92 с.
 48. Крутов, В. И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Недра, 1980. – С. 83–91.
 49. Левинштейн, М. Л. Статическая устойчивость электрических систем / М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев. – СПб.: СПбГТУ, 1994. – 264 с.
 50. 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
 51. 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 // 2022 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). – 2022. – P. 276–282.
 52. 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). – 2020. – P. 276–282.
53. 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), 2021 International Conference. – 2021. – P. 2498–2500.
 54. 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.
 55. 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.
 56. 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), 2022 International Conference, 2022. – P. 447–447.
 57. 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 – 2020. IEEE Xplore TM IEEE Catalog Number CFP1656H-ART, ISBN 978-1-5090-1841-3.
 58. 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. – 2022. – Vol.7 (3). – P. 66–73.
 59. 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 2022 Fourth International Conference. – P. 291–297.

60. 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. – 2022. – vol. 54. – P. 176–189.