

Воздействие на рабочий процесс газопоршневого двигателя установкой заслонок в систему воздуха горения

С.Е. Андрусенко, к.т.н., начальник отдела по системам двигателя, М.В. Фролов, начальник отдела автоматики и регулирования, А.В. Фофанов, инженер-конструктор службы главного конструктора по двигателям внутреннего сгорания, АО «РУМО», г. Нижний Новгород, Россия
(e-mail: s.andrusenko@aorumo.ru, m.frolov@aorumo.ru)

В статье рассмотрено влияние на рабочий процесс газового двигателя изменение количества поступившего на горение воздуха, путем установки заслонок. Проанализированы конструкции отечественных и зарубежных аналогов. Предложен алгоритм работы заслонок для повышения стабильности и улучшения экологических и экономических показателей работы двигателя. Анализ был приведен для газового двигателя, работающего на генератор.

Главным преимуществом газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием в сравнении с традиционной системой зажигания является работа на обедненной смеси, что позволяет снизить вредные выбросы в отработавших газах (ОГ) на соответствие ГОСТ 31967-2012 «Выбросы вредных веществ с отработавшими газами» до норм удельных средневзвешенных выбросов при постановке на производство с 2021 г. без применения дорогостоящих катализаторов.

Обеднение смеси до коэффициента избытка воздуха более 2,2 позволяет снизить концентрацию оксидов азота и углерода, снизить показатели дымности ОГ, уменьшить расход топлива. Однако дальнейшее обеднение смеси $\alpha > 2,4$ (см. рис. 1) приводит к пропускам зажигания, что ведет к ухудшению энергетических и экологических показателей работы двигателя.

Таким образом процесс регулирования количества подаваемого воздуха представляет собой очень важную задачу, так как коридор эффективной и экологичной работы двигателя имеет весьма узкие границы.

Рабочий процесс

Из рисунка 1 видно, что для эффективной и экологичной работы двигателя необходим рабочий процесс, протекающий

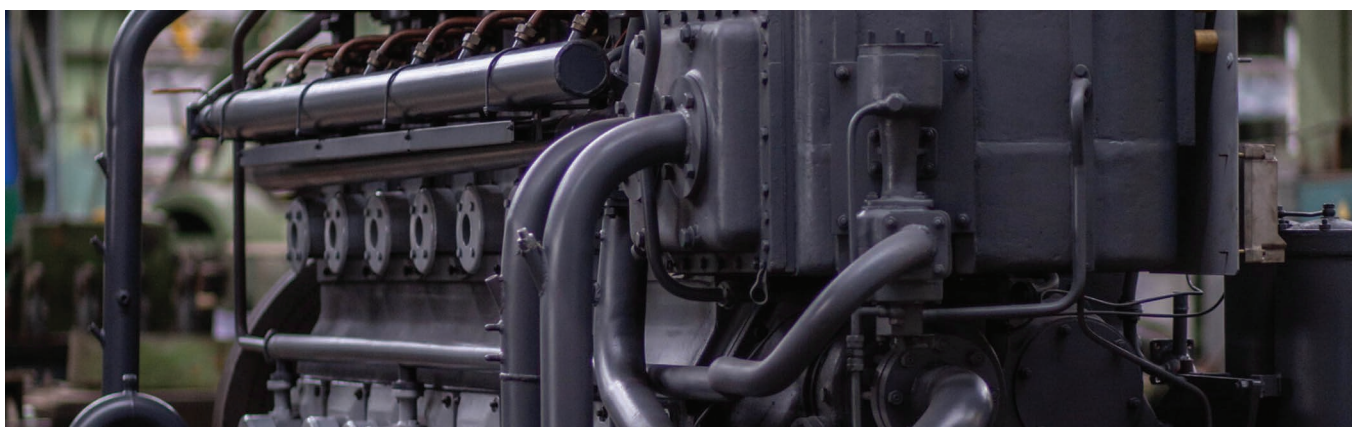
при высоком избытке воздуха. Однако дальнейшее обеднение смеси ведет к пропуску зажигания, что негативно сказывается на работе двигателя и его показателях.

Увеличение коэффициента избытка воздуха ведет к уменьшению температуры сгорания и, как следствие, к уменьшению содержания оксидов азота в отработавших газах, наиболее токсичного элемента ОГ [1].

В двигателе с форкамерно-факельным зажиганием воспламенение происходит в камере меньшего объема – примерно 3-4% от объема основной камеры сгорания, имеющей обогащенную топливо-воздушную смесь, за счет добавления форкамерного газа. Такой объем предполагает гарантированное воспламенение смеси свечей зажигания и формирования газовой струи большой энергии, ведущей к воспламенению остального топлива, находящегося в основной камере.

Для качественного сгорания смеси требуется поддержание коэффициента избытка воздуха α в объеме камеры сгорания, количества поступившего газа в форкамеру, угла зажигания.

Качество рабочего процесса напрямую зависит от процессов, происходящих в форкамере, а также количества воздуха в обеих камерах.



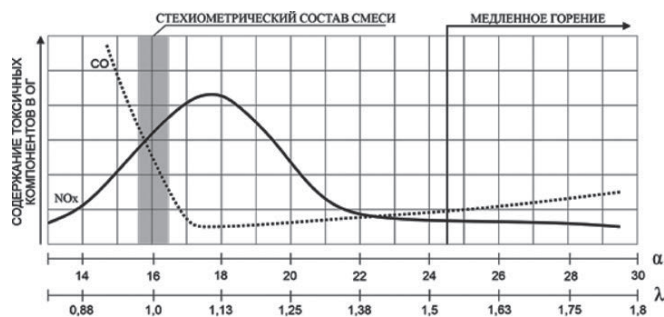


Рис. 1. Эмиссия NO_x и CO в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха:–

В зависимости от количества воздуха, поступившего в цилиндр, возможно регулирование рабочего процесса в сторону улучшения или ухудшения определенных параметров двигателя, например, экологических, либо экономических. С другой стороны, в определенных обстоятельствах можно влиять на динамику и приемистость двигателя. На рисунке 2 представлены области зон детонации и пропуска вспышек в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

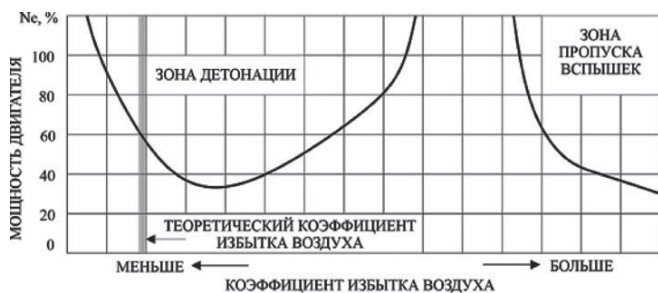


Рис. 2. Зоны детонации и пропуска вспышек газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием от коэффициента избытка воздуха

С увеличением нагрузки вероятность перехода рабочего процесса в зону детонации или пропуска вспышки возрастает. Особенно важным этот вопрос становится при мгновенном изменении нагрузки газового двигателя, например, при использовании двигателя в качестве судового, где существенными являются резкие нагрузки под влиянием погодных условий, волнения на море, оголением и погружением винта.

Управление рабочим процессом

Ведущие двигателестроительные заводы ведут исследования по организации рабочего процесса двигателя за счет изменения формы и объема форкамеры, изменения угла зажигания в зависимости от различных параметров, параметров воздушоснабжения.

Наиболее распространенными способами воздействия на снабжение воздухом цилиндров являются: байпасирование и дросселирование воздуха на подаче, применение вестгейта (стравливание ОГ помимо турбины) [2].

Швейцарская фирма АВВ предлагала работу при совместной работе байпасной заслонки и клапана перепуска ОГ в зависимости от нагрузки двигателя. Если эксплуатационный график нагрузки показывал редкое использование режимов нагрузки от 90% до 110% мощности, то параметры

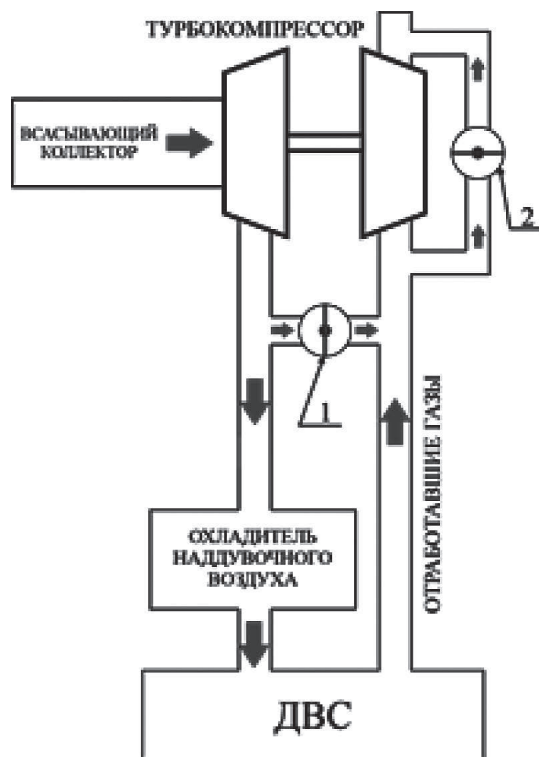


Рис. 3. Система управления воздушоснабжением цилиндров двигателя: 1 – байпасный клапан, 2 – клапан перепуска отработавших газов

турбокомпрессора настраивались на режим 85% мощности, при котором газовый двигатель достигал максимальных значений средне эффективного давления. При 86% мощности открывался клапан перепуска отработавших газов и давление отработавших газов перед турбиной снижалось, в результате при 100% нагрузке соблюдалось ограничение максимального давления в цилиндрах двигателя. В дополнение к сбросу ОГ клапаном перепуска, перепуск наддувочного воздуха, осуществляемый на частичных нагрузках вплоть до 50% мощности, дополнительно увеличивал коэффициент избытка воздуха за счет смещения рабочих точек на характеристиках турбокомпрессора в сторону более высоких КПД. Указывалось, что двигатель при работе с такой системой ведет себя как двигатель с более эффективной системой турбонаддува. Наддувочный воздух на выходе из компрессора подводился к выхлопному коллектору непосредственно перед входом в турбину, это позволяло сдвинуть рабочую точку в сторону более высоких КПД компрессора.

Графически совместная работа байпасной заслонки и клапана перепуска отработавших газов приведена на рисунке 4.

Дальнейшее развитие схемы воздушоснабжения получило в работах фирмы Yanmar для газового двигателя EY26L [3], с отличием, состоящим в том, что для оптимизации рабочего процесса наряду с оптимизацией фазы впрыска горящего факела форкамеры (угла опережения зажигания) и массового расхода воздуха, поступающего в форкамеру газа, оптимизировался коэффициент избытка воздуха в цилиндре по величине коэффициента остаточного кислорода в отработавших газах λ (рисунок 5).

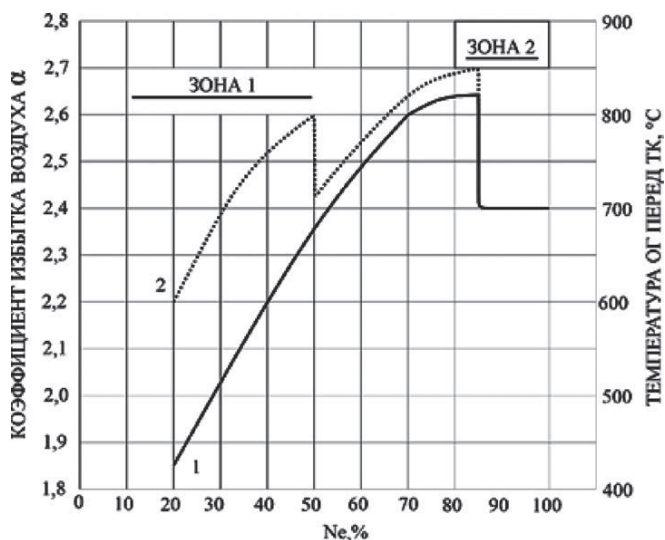


Рис. 4. Совместная работа байпасной заслонки и клапана перепуска отработавших газов: зона 1 – граница работы байпасной заслонки, зона 2 – граница работы клапана перепуска отработавших газов, 1 – зависимость коэффициента избытка воздуха от нагрузки с применением клапана перепуска отработавших газов, 2 – зависимость коэффициента избытка воздуха от нагрузки с применением байпасного клапана и клапана перепуска отработавших газов

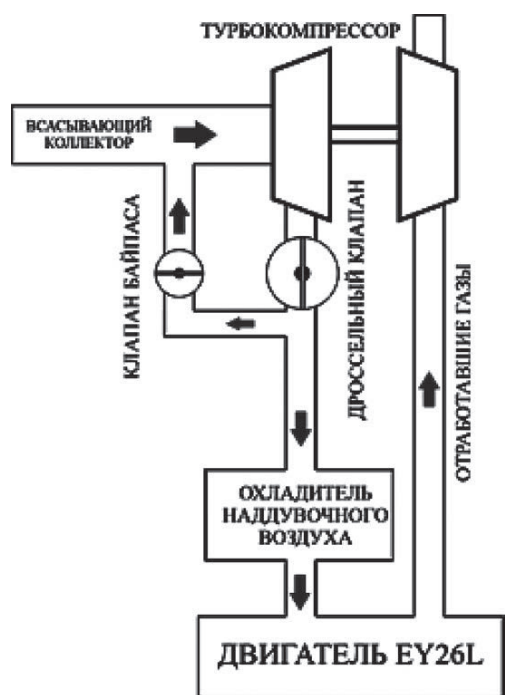


Рис. 5. Схема системы управления давлением наддувочного воздуха газового двигателя EY26L

Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха выбирается с учетом возможного смещения линий, вызванного изменением нагрузки и теплотворной способностью топлива. Для сохранения высоких показателей мощности, безопасности, экологичности и экономичности двигателя необходимо оставаться в узком промежутке между зоной детонации и зоной пропуска всплеск. Прогнозируемая нагрузка рассчитывалась на основе интерполяции частотных характеристик, полученных в результате эксплуатации

двигателей на судах, в результате чего был разработан метод настройки λ . Система топливоподачи при этом должна быстро реагировать на изменение нагрузки с помощью электромагнитных клапанов и начала подачи топлива (рисунок 6).

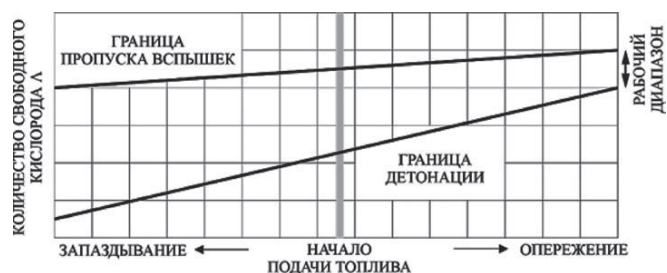


Рис. 6. Рабочий диапазон газового двигателя

Система управления λ для газового двигателя EY26L с байпасным клапаном регулирует давление наддува, изменяя расход воздуха на линии возврата в турбокомпрессор (рисунок 6). Это делается для снижения инерционности системы. Указывается, что диапазон регулирования байпасным клапаном недостаточен, особенно при малых нагрузках, и дальнейшее улучшение динамики достигается применением дросселя в линии подачи (главного дроссельного клапана). Управление обоими клапанами – байпасным и главным – производится в зависимости от нагрузки. В области малых расходов управление осуществляется главным дроссельным клапаном, а в области средних и больших расходов – байпасным клапаном. Таким образом обосновывается, что совместная работа обоих клапанов позволяет обеспечить управление коэффициентом избытка воздуха во всем диапазоне нагрузок.

На ОАО «Коломенский завод» в 2018 г. был получен патент на создание способа управления газовым двигателем, устраняющего детонационные явления в двигателе [4]. Сущность изобретения заключается в том, что по сигналам от датчиков детонации, установленных для каждого цилиндра многоцилиндрового двигателя, имеющего в своем составе турбоагрегат, через который воздух подается в двигатель, воздушную заслонку, регулирующую количество подаваемого воздуха по сигналу от датчика концентрации свободного кислорода в отработавших газах, индивидуальные газораспределительные клапаны для каждого цилиндра, регулирующие расход топливного газа, подаваемого в каждый цилиндр двигателя, для ухода от детонационных процессов горения и уменьшающие с помощью электромагнитных клапанов количество топливного газа, подаваемого в детонирующий цилиндр до исчезновения детонации с последующим восстановлением до заданного значения на текущей частоте вращения двигателя, с целью уменьшения нагрева стенок камеры сгорания и ухода от процессов детонационного горения, вызванного калильным зажиганием.

Аналогичные системы запатентованы в России не только для стационарных, транспортных и судовых двигателей, но и для транспортных автомобильных типа «КАМАЗ», но более усложнены.

Адаптивная система управления рабочим процессом

Двигатель внутреннего сгорания представляет собой многомерный нелинейный объект управления. Он состоит из многих подсистем, которые взаимосвязаны друг с другом и образует единое целое [5, 6, 7]. Для обеспечения высоких показателей такой системы необходимо решить задачу об оптимальном управлении.

В работе [8] указывается, что особенностью систем автоматической адаптации является закон регулирования, изменяемый самой системой. В программно-адаптивных системах управления основная программа корректируется в зависимости от информации на выходе системы введением обратной связи по тому или иному критерию.

В настоящее время на заводе АО «РУМО» разработана и проходит испытания адаптивная система управления рабочим процессом газового двигателя РУМО-502 с оптимальным набором контролирующих и управляющих элементов. Двигатель имеет технические характеристики, представленные в таблице 1.

Для адаптивной системы ставится задача обеспечить наибольшую эффективность работы газопоршневого двигателя по критерию оптимального коэффициента избытка воздуха, определяемого по содержанию свободного кислорода в ОГ.

Таблица 1. Технические характеристики двигателя РУМО-502

Параметр	Значение
Тип двигателя	Газовый двигатель с искровым форкамерно-факельным зажиганием
Рабочий объем цилиндра, л	10,5
Диаметр цилиндра x ход поршня, мм	220x280
Частота вращения двигателя, об/мин	1000
Цилиндровая мощность, кВт	131,5
Среднее эффективное давление, МПа	1,406
Число цилиндров	8
Вид топлива	Природный газ

Под адаптивным управлением понимается такое управление, при котором в процессе функционирования система управления реагирует на изменение свойств объекта управления и внешних воздействий и на основании результатов обработки соответствующей информации приспосабливается к новым условиям путем изменения структуры и параметров системы управления или некоторой ее части так, чтобы показатель качества каждый раз достигал экстремального значения или находился в заданном диапазоне [8]. Принципиальная схема системы управления приведена на рисунке 7.

В системе установлены электронные клапаны подачи топливного газа, подающие топливный газ в цилиндры двигателя, в выпускной трубе установлен λ -зонд для определения концентрации свободного кислорода в отработавших газах двигателя. Условно коэффициент свободного кислорода связан с коэффициентом избытка воздуха, как показано на рисунке 1.

На входе в наддувочный ресивер после турбокомпрессора установлены дроссельная и байпасная заслонки, предназначенные для изменения расхода воздуха в двигатель и раз-

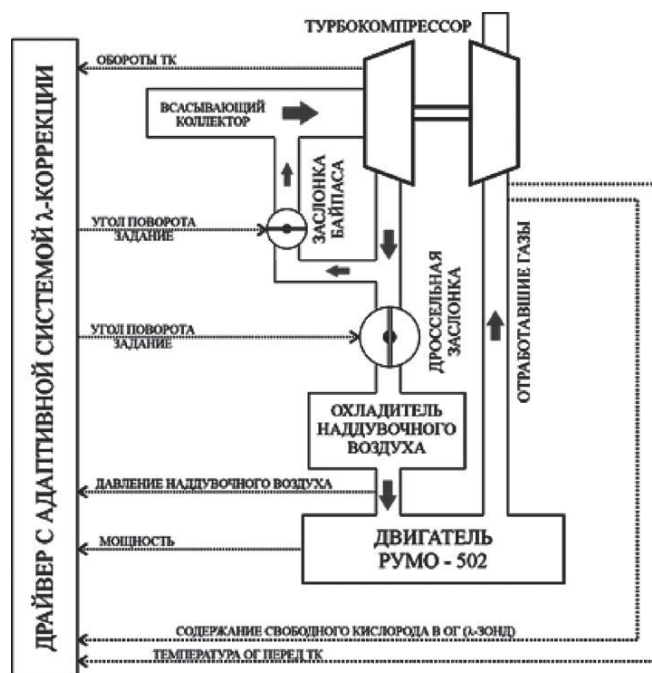


Рис. 7. Схема адаптивной системы управления газовым двигателем

грузки линии нагнетания воздуха от избыточного давления перепуском части воздуха в воздушный трубопровод линии атмосферного воздуха перед турбокомпрессором.

Метод дросселирования на нагнетании (равно как и метод дросселирования на всасывании) не меняет характеристики компрессорной ступени ТК [10], меняет только характеристику нагрузки компрессора, добавляя характеристику (сопротивление) дросселя на нагнетании к характеристике (сопротивлению) системы подачи воздуха на горение. При полностью открытой дроссельной заслонке характеристика нагрузки ТК имеет положение С1, и выходные параметры компрессорной ступени определяются рабочей точкой РТ1, как показано на рисунке 8 (при определенном расходе воздуха и степени повышения давления).

Рассматривая квазистатический режим при неизменных внешних параметрах, при закрытии дроссельной заслонке рабочая точка ТК смещается в сторону границы помпажа и ограничивается конструктивным исполнением заслонки, неспособной полностью перекрыть сечение воздушного тракта от ТК до охладителя наддувочного воздуха. При полностью закрытой дроссельной заслонке характеристика нагрузки ТК будет соответствовать точке РТ2 (с меньшим расходом и большим давлением по отношению к рабочей точке РТ1).

Метод байпасирования также не изменяет газодинамическую характеристику компрессорной части ТК, а изменяет характеристику нагрузки, причем если при дросселировании сопротивление нагрузки складывается с сопротивлением дросселя, то при открытии байпасного клапана от характеристики нагрузки вычитается характеристика байпасной заслонки, то есть сопротивление работе ТК уменьшается [10].

На рисунке 8 показана рабочая точка РТ3 при определенных начальных условиях при полностью закрытой байпасной заслонке. Приоткрытие заслонки ведет к перемещению рабочей точки вниз и вправо по кривой газоди-

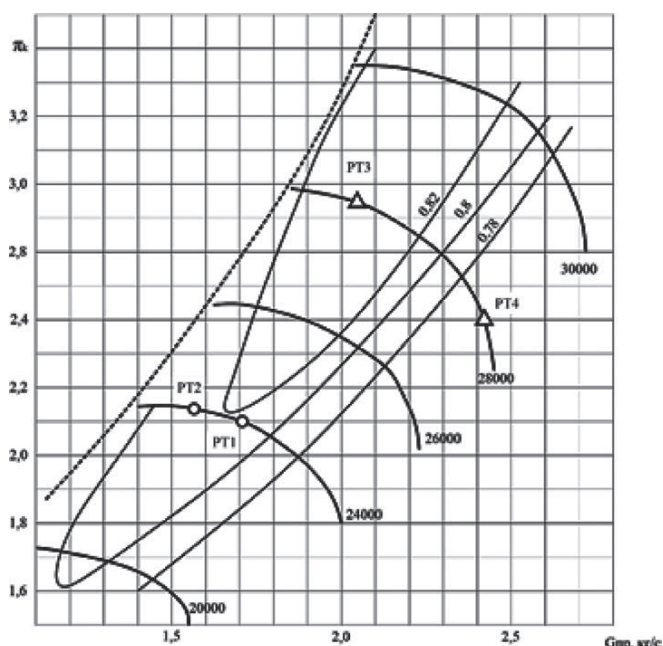


Рис. 8. Влияние методов дросселирования и байпасирования на характеристики ТК

намической характеристики, рассматриваемой в квазистатическом режиме, до положения РТ4, определяемой полностью открытым положением байпасной заслонки. При закрытии байпаса рабочая точка возвращается в положение РТ3. В литературе [10] также указывается, что метод байпасирования ведет к явным потерям мощности, но является практически единственным надежным методом защиты от помпажа.

В состав адаптивной системы входит драйвер – электронный блок регулирования подачи воздуха посредством регулирующих заслонок в цилиндры двигателя, работающий от сигнала датчика λ -зонда, учитывающий текущую нагрузку на двигатель, температуру ОГ перед турбинной частью ТК, давление наддувочного воздуха, обороты ТК и управляющего углами поворота заслонок, тем самым изменяя расход воздуха через двигатель и соответственно коэффициент избытка воздуха α .

Таким образом, α можно определить как функцию, зависящую от нескольких параметров двигателя:

$$\alpha = f(N_e, \lambda, P_{нв}, T_{тк}, n_{тк}) \quad (1)$$

где: N_e – нагрузка на двигатель, λ – коэффициент остаточного кислорода в отработавших газах, $P_{нв}$ – давление наддувочного воздуха, $T_{тк}$ – температура отработавших газов до турбокомпрессора, $n_{тк}$ – обороты турбокомпрессора.

Алгоритм работы адаптивной системы λ -коррекции представлен на рисунке 9.

В адаптивной системе управления регулирование давления наддувочного воздуха при работе двигателя под нагрузкой осуществляется байпасной заслонкой, управление дроссельной заслонкой происходит при запуске двигателя и работе на холостом ходу, обеспечивая быстрый запуск двигателя. Регулирование дроссельной заслонкой при работе на малых нагрузках также позволяет скорректировать работу ТК и отодвинуть рабочую точку от зоны помпажа. Таким образом, при запуске двигателя и работе на холостом ходу уменьшается проходное сечение для подачи воздуха от ТК в воздушный ресивер. Двигатель на этих режимах получает

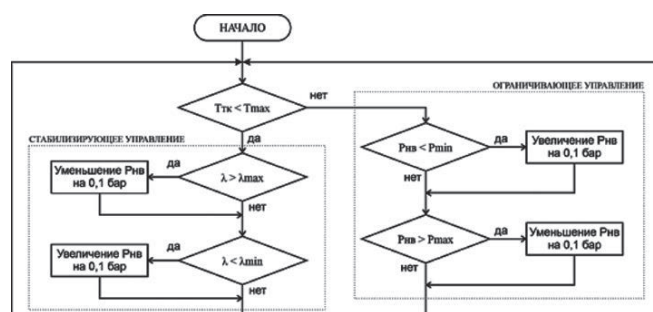


Рис. 9. Алгоритм работы адаптивной системы управления рабочим процессом: $T_{тк}$ – температура ОГ перед ТК, T_{max} – максимальная температура для $T_{тк}$, $P_{нв}$ – давление наддувочного воздуха, P_{min} , P_{max} – зона рабочего давления наддува (коррелируется по нагрузке на двигатель), λ – количество остаточного кислорода в ОГ, λ_{min} , λ_{max} – диапазон уставки остаточного кислорода (коррелируется по нагрузке на двигатель)

воздух в основном от насосных ходов [9], а количество воздуха ограничивается для получения точного состава смеси в цилиндрах.



<https://aorumo.ru/>

Литература:

1. Reciprocating engines[online] https://petrowiki.spe.org/Reciprocating_engines.
2. Материалы фирмы АВВ (Швейцария) по способу управления рабочим процессом газового двигателя (переписка гл. конструктора ОАО «РУМО» с фирмой АВВ), 2000-2001 г. (из архива завода).
3. Развитие конструкции газовых двигателей (по материалам конгресса СИМАС). Новый газовый двигатель фирмы Yanmar. Перевод Г. Мельникова. Ж-л «Двигателестроение» №3, 2020, стр. 25-42.
4. Калинин В.В., Буров С.В., Здоренко В.А. Способ управления газовым двигателем внутреннего сгорания. Патент RU 2695583 от 20.06.2018 г.
5. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. М.: Машиностроение, 1978. – 472с.: ил.
6. Покровский Г.П., Белов Е.А., Драгомиров С.Г., и др.: Под общ. Ред Г.П. Покровского. Электронное управление автомобильными двигателями. – М.: Машиностроение, 1994. – 336с.: ил.
7. Вошанкин С.В. Разработка структуры и алгоритмов обучающихся контуров в микропроцессорных системах управления автомобильных двигателей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели. Москва 2004, 197 стр.
8. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256с.: ил.
9. Межеричкий А.Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей. «Судостроение», 1971, 192с.
10. Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров. – Казань: ФЭН, 2010. – 671с. ●