

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ ГАЗОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С.Е. Андрусенко, к.т.н., М.В. Фролов, нач. отдела, А.В. Фофанов, инж. АО «РУМО»

В статье проведен анализ существующих систем подачи воздуха в цилиндры газопоршневого двигателя для достижения оптимального значения коэффициента избытка воздуха в рабочем процессе. Предложено устройство и алгоритм работы устройства для регулирования коэффициента избытка воздуха по величине содержания свободного кислорода в отработавших газах. Обоснована возможность управления рабочим процессом в период подготовки начала сгорания и приведены примеры механизмов отечественных и зарубежных аналогов, обеспечивающих управление рабочим процессом.

Рабочие параметры газового двигателя и организация рабочего процесса во многом определяется согласованной работой турбокомпрессора и газовых клапанов, подающих газ в камеру сгорания двигателя. Газовый двигатель с форкамерно-факельным зажиганием работает на обедненной смеси. Обеднение смеси позволяет снизить концентрацию окислов азота и окиси углерода, не вызывая увеличения концентрации углеводородов, и одновременно обеспечить уменьшение расхода топлива, поэтому такой способ организации рабочего процесса перспективен для газовых двигателей. Коэффициент избытка воздуха α при этом выбирается таким, чтобы уровень выбросов NO_x не превышал предельно допустимых значений, установленных IMO Tier III.

При оценке выбросов вредных веществ двигателя следует учитывать, что каждый цилиндр представляет собой закрытую систему [1]. Суммарные выбросы вредных веществ двигателя складываются из отдельных выбросов каждого из работающих цилиндров. Чем меньше будет выброс вредных веществ из каждого цилиндра, тем меньше будут суммарные выбросы двигателя.

Отсюда можно сформировать три основных требования к конструкции камер сгорания, конструкции и конструктивным параметрам систем питания, выпуска отработавших газов и управления двигателем, а также использованию различных методов наддува:



- точное соотношение воздуха и топлива в каждом цилиндре при любых режимах работы двигателя;

- в каждом цилиндре должно быть одинаковое количество топливовоздушной смеси;

- в каждом цилиндре топливовоздушная смесь должна быть однородной по составу.

В двигателях с принудительным зажиганием при работе даже на установившемся режиме от цикла к циклу всегда присутствуют изменения в процессе сгорания и давлении в цилиндре [2]. Были обнаружены три причины изменения скорости горения смеси:

- изменения в движении газа в цилиндре влияют на скорость распространения пламени;

- изменения в количестве топлива и воздуха приводят к тому, что количество энергии в цилиндре изменяется от одного цикла к другому;

- пространственные изменения концентрации воздуха в различных циклах одного и того же цилиндра.

Явления межциклового неустойчивости и колебания давления в цилиндрах двигателя с принудительным зажиганием при неизменяющихся внешних факторах требуют наличия в составе двигателя системы управления, способной снизить влияние этих неблагоприятных факторов.

Организация рабочего процесса

Принятая стратегия организации рабочего процесса заключается в том, чтобы двигатель работал с как можно большим, при этом оптимальным количеством избыточного воздуха.

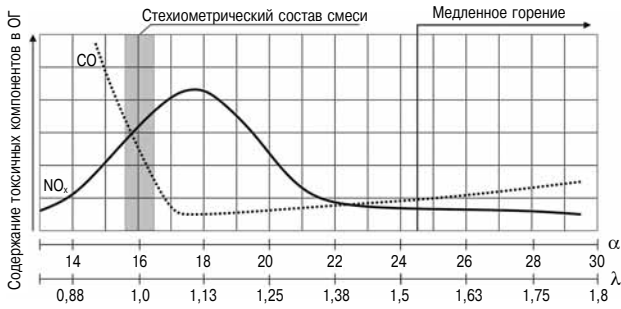


Рис. 1. Эмиссия NO_x и CO в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха α

Ограничивающими факторами при этом являются исключение пропусков вспышек обедненной газовой смеси и достижение полного сгорания с минимальным выбросом вредных веществ.

Причина, по которой этот подход снижает содержание NO_x, заключается в низкой температуре сгорания газо-воздушной смеси с большим избытком воздуха (рис. 1). Если в цилиндре сжато больше воздуха, теплота воздушного заряда в цилиндре выше, это означает, что он может поглощать такое же количество тепла с меньшим повышением температуры [3].

Для воспламенения обедненной смеси в камере сгорания двигателя применяется форкамерная система зажигания, то есть имеется предкамера с объемом, соотносящимся с объемом основной камеры сгорания в цилиндре в отношении 0,025. В форкамере установлена свеча зажигания. Газовая струя, исходящая с высокой энергией из форкамеры надежно зажигает обедненную смесь в цилиндре двигателя.

Для обеспечения качественного воспламенения и горения смеси требуется оптимизация коэффициента избытка воздуха α в объеме камеры сгорания двигателя, фазы впрыска, массового расхода, поступающего в форкамеру газа, и угла опережения зажигания. Скорость и стабилизация горения смеси в цилиндре увеличивается с увеличением расхода газа, подаваемого в форкамеру.

Известно, что в зависимости от количества воздуха, подаваемого в цилиндр, зависит характер

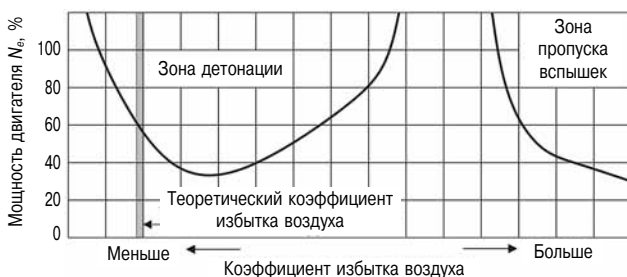


Рис. 2. Характеристика рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием

протекания рабочего процесса газового двигателя. На рис. 2 представлена характеристика рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием в зависимости от состава смеси в цилиндре двигателя.

С ростом мощности двигателя вероятность попадания рабочего процесса в зону детонации и пропуска вспышки существенно возрастает. Особенно важным этот вопрос становится при создании газового двигателя судового назначения вследствие колебания нагрузки под влиянием погодных условий и волнения на море.

Способы управления рабочим процессом

Различные двигателестроительные фирмы для решения вопроса организации рабочего процесса наряду с оптимизацией конструкции форкамеры, фаз газораспределения и угла опережения зажигания проводят исследования в направлении оптимизации зарядки цилиндров двигателя.

В 2007 г. Фирма АВВ (Швейцария) предложила способ установки байпасной заслонки в воздушный тракт двигателя после турбокомпрессора и клапана перепуска отработавших газов для

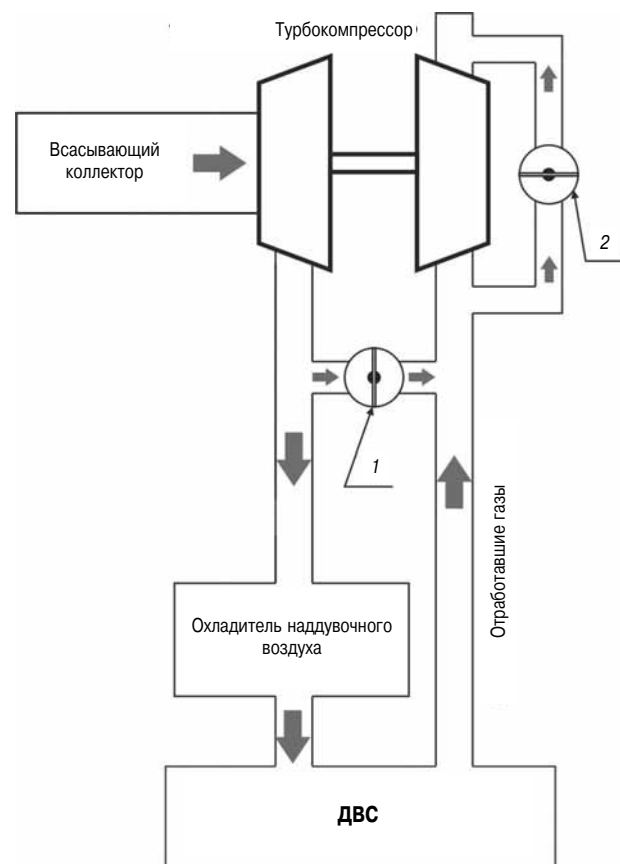


Рис. 3. Система управления воздушоснабжением цилиндров двигателя:

1 — байпасный клапан, 2 — клапан перепуска отработавших газов

регулирования коэффициента избытка воздуха на частичных нагрузках (рис. 3) [4].

Схема, предложенная АВВ, предусматривала совместную работу байпасной заслонки и клапана перепуска отработавших газов в зависимости от нагрузки двигателя. Если эксплуатационный график нагрузки двигателя показывал кратковременное использование режимов от 90 до 110 % мощности, то параметры турбины настраивались на режим 85 % мощности, при котором двигатель достигал максимальных значений среднего эффективного давления в цилиндрах. При 86 % мощности открывался клапан перепуска отработавших газов и давление отработавших газов перед турбиной снижалось, в результате при 100 % нагрузке обеспечивалось ограничение максимального давления в цилиндрах двигателя. В дополнение к сбросу отработавших газов клапаном перепуска, осуществлялся перепуск наддувочного воздуха, на частичных нагрузках вплоть до 50 % мощности, что повышает коэффициент избытка воздуха за счет смещения рабочих точек на характеристиках турбокомпрессора в сторону более высоких КПД. Указывалось, что такая система наддува является более эффективной. Наддувочный воздух на выходе из компрессора подводился к выпускному коллектору непосредственно перед входом в турбину, что позволяло сдвинуть рабочую точку в сторону более высоких КПД компрессора.

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

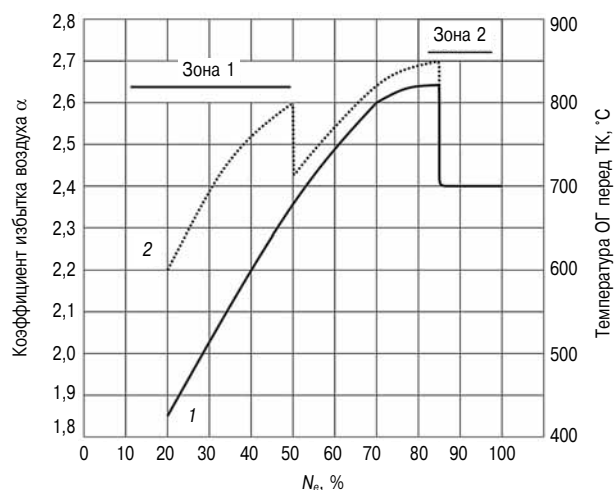


Рис. 4. Совместная работа байпасной заслонки и клапана перепуска отработавших газов:

зона 1 — граница работы байпасной заслонки; зона 2 — граница работы клапана перепуска отработавших газов; 1 — зависимость коэффициента избытка воздуха от нагрузки при работе клапана перепуска отработавших газов; 2 — изменение коэффициента избытка воздуха от нагрузки при совместной работе байпасного клапана и клапана перепуска отработавших газов

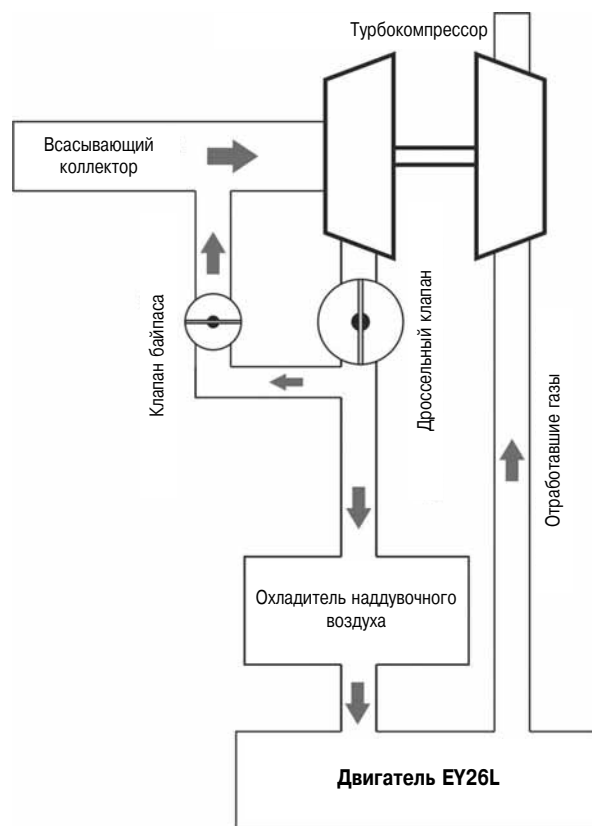


Рис. 5. Схема системы управления давлением наддувочного воздуха газового двигателя EY26L

Дальнейшая схема оптимизации воздушно-снабжения получила развитие в работах фирмы Yanmar для газового двигателя EY26L [5]. Отличие состояло 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 (рис. 5).

Оптимальное значение коэффициента избытка свободного кислорода λ 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 интервале между зоной детонации и зоной пропуска вспышек. 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 (рис. 6).

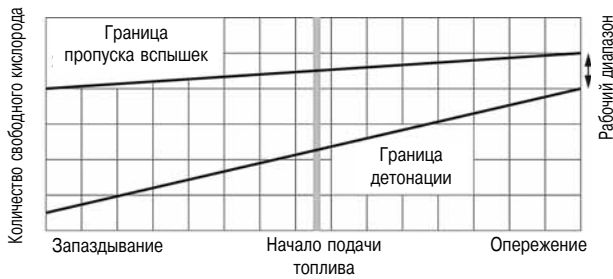


Рис. 6. Рабочий диапазон газового двигателя

Система управления λ для газового двигателя EY26L с байпасным клапаном регулирует давление наддува, изменяя расход воздуха на линии возврата (в турбокомпрессор) в обоих направлениях (рис. 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 воздуха (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, устраняющий детонационные явления [6]. Сущность изобретения заключается в том, что по сигналам от датчиков детонации, установленных на каждом цилиндре многоцилиндрового двигателя, имеющего в своем составе турбонагнетатель, через который воздух подается в двигатель, воздушную заслонку, регулиующую 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 с помощью электромагнитных клапанов уменьшается 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 су-

довых 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 [7–9]. Для обеспечения высоких показателей такой системы необходимо решить задачу оптимального управления.

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 контролируемых и управляющих элементов. Двигатель имеет технические характеристики, представленные в табл. 1.

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

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 приспособляется к новым условиям путем изменения структуры и параметров системы управления или некоторой ее части так, чтобы показатель ка-

Основные технические характеристики двигателя РУМО-502

Параметры	Значения
Тип двигателя	Газовый двигатель с искровым зажиганием
Рабочий объем цилиндра, л	11,8
Диаметр цилиндра x ход поршня, мм	220x280
Частота вращения двигателя, об/мин	1000
Цилиндровая мощность, кВт	131,5
Среднее эффективное давление, МПа	14,06
Число цилиндров	8
Вид топлива	Природный газ

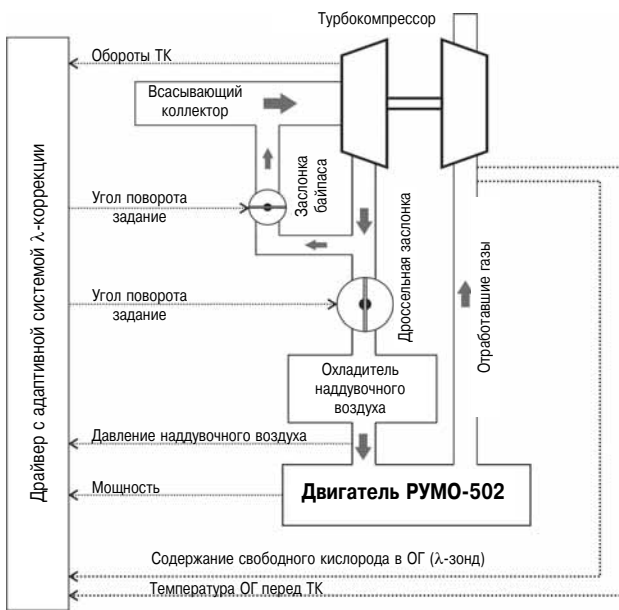


Рис. 7. Схема адаптивной системы управления газовым двигателем РУМО-502

чества каждый раз достигал экстремального значения или находился в заданном диапазоне [10]. Принципиальная схема системы управления приведены на рис. 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 рис. 1.

На входе во впускной ресивер после турбокомпрессора установлены дроссельная и байпасная заслонки, предназначенные для изменения расхода воздуха в двигатель и разгрузки линии нагнетания воздуха от избыточного давления перепуском части воздуха в воздушный трубопровод линии атмосферного воздуха перед турбокомпрессором.

В состав адаптивной системы входит драйвер — электронный блок регулирования подачи воздуха в цилиндры двигателя, работающий от сигнала датчика λ -зонда, учитывающий текущую нагрузку на двигатель, температуру отработавших газов перед турбинной частью ТК, давление наддувочного воздуха, обороты турбокомпрессора 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:

$$\alpha = f(P_e, \lambda, p_{нв}, T_{ог}, n_{тк}) \quad (1)$$

где: P_e — нагрузка на двигатель, λ — коэффициент остаточного кислорода в отработавших газах, $p_{нв}$ — давление наддувочного воздуха, $T_{ог}$ — температура отработавших газов перед турбиной, $n_{тк}$ — обороты турбокомпрессора.

Алгоритм работы адаптивной системы λ -коррекции представлен на рис. 8.

В адаптивной системе управления регулирование давления наддувочного воздуха при работе двигателя под нагрузкой осуществляется байпасной заслонкой, управление дроссельной заслонкой происходит при запуске двигателя и при работе

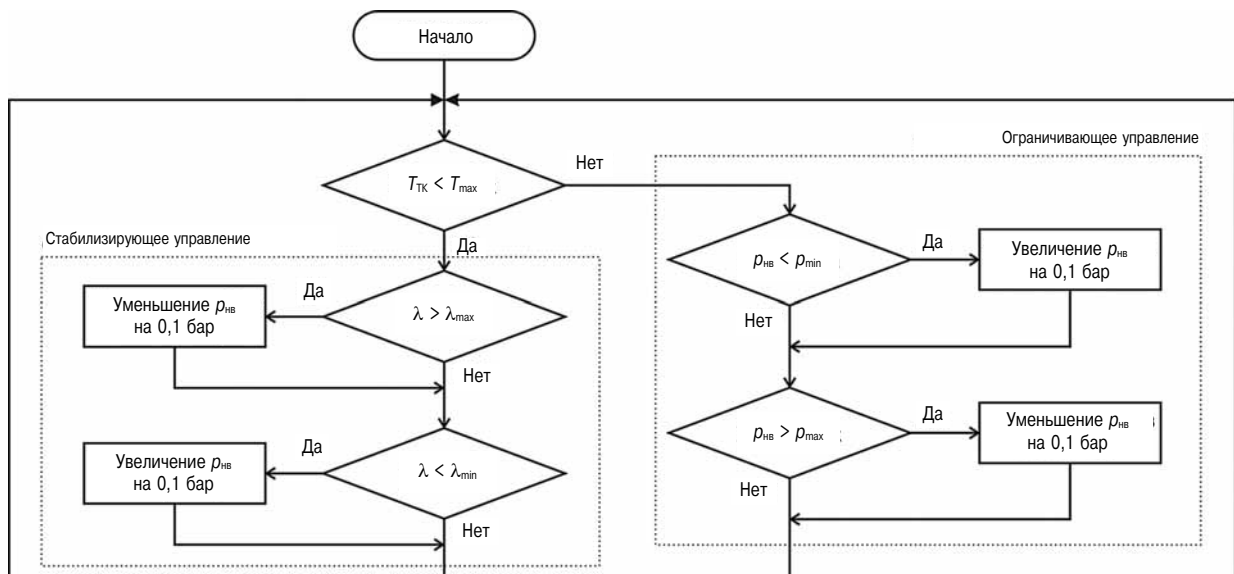


Рис. 8. Алгоритм работы адаптивной системы управления рабочим процессом:

$T_{ог}$ — температура ОГ перед ТК; T_{max} — максимальная температура для 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)

на холостом ходу, обеспечивая быстрый запуск двигателя. Регулирование дроссельной заслонкой при работе на малых нагрузках также позволяет скорректировать работу турбокомпрессора и отодвинуть рабочую точку от зоны помпажа. Таким образом, при запуске двигателя и при работе на холостом ходу уменьшается проходное сечение для подачи воздуха от турбокомпрессора в воздушный ресивер. Двигатель на этих режимах получает воздух в основном от насосных ходов [11], а количество воздуха ограничивается для получения стехиометрического состава смеси в цилиндрах.

Литература

1. УВЕ РОКОШ Бортовая диагностика. Перевод с нем. ООО «СтарСПб». М. : ООО «Издательство «За рулем», 2013. 224 с .
2. *Lars Eriksson, Lars Nielsen*. Modeling and Control of Engines and Drivelines (Automotive Series) 1st Edition, Kindle Edition. Wiley; 1st edition (February 27, 2014) 556 p.
3. Reciprocating engines[online] https://petrowiki.spe.org/Reciprocating_engines
4. 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).
5. Развитие конструкции газовых двигателей (по материалам конгресса СИМАС). Новый газовый двигатель фирмы «Yanmar». Перевод Г. Мельника // Двигателестроение. 2020. № 3. С. 25–42.
6. *Калиниченко В.В., Буров С.В., Здоренко В.А.* Способ управления газовым двигателем внутреннего сгорания. Патент RU 2695583 от 20.06.2018 г.
7. *Крутов В.И.* Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. М. : Машиностроение, 1978. 472 с.
8. *Покровский Г.П., Белов Е.А., Драгомиров С.Г., и др.* : Под общ. Ред Г.П. Покровского. Электронное управление автомобильными двигателями. М. : Машиностроение, 1994. 336 с.
9. *Воцанкин С.В.* Разработка структуры и алгоритмов обучающихся контуров в микропроцессорных системах управления автомобильных двигателей: дис. ... докт. техн. наук. Москва 2004, 197 с.
10. *Чураков Е.П.* Оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие для вузов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
11. *Межеричкий А.Д.* Турбокомпрессоры судовых дизелей // Судостроение. 1971. 192 с.