

**КУЗНЕЦОВ**

Александр Гаврилович  
доктор технических наук,  
доцент, профессор

**БОКОВИКОВ**

Алексей Николаевич  
аспирант  
кафедры  
«Теплофизика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

## Система управления турбокомпрессором с турбиной изменяемой геометрии

**А.Г. Кузнецов, А.Н. Боковиков**

*Рассмотрена система автоматического управления турбокомпрессором с изменяемой геометрией турбины, обеспечивающая улучшение экономических и экологических показателей дизеля.*

**Ключевые слова:** система автоматического управления, турбина, оптимизация, экономические и экологические показатели.

*The automatic control system of the turbine with changeable geometry, providing improvement of economic and ecological indicators of a diesel engine is considered.*

**Keywords:** automatic control system, turbine, optimization, economic and ecological indicators.

В настоящее время большое распространение получила система наддува дизелей с использованием турбины изменяемой геометрии (ТИГ). Турбина с переменным положением направляющих лопаток является одним из конструктивных решений для ТИГ. Направляющие лопатки меняют свое положение в результате поступления на исполнительное устройство сигналов от контроллера системы автоматического управления (САУ). Величина сигнала зависит от требований к рабочему процессу двигателя в данный момент времени. Информация о протекании рабочего процесса поступает в систему управления от датчиков, установленных на элементах комбинированного двигателя. Использование турбины изменяемой геометрии позволяет регулировать давление воздуха во впускном трубопроводе практически на всех режимах работы дизеля, в том числе — на режимах малых нагрузок.

Управление процессом воздухообеспечения является неотъемлемой частью системы управления комбинированного двигателя в целом. Для снижения выбросов вредных веществ необходимо обеспечить управление параметрами наддувочного воздуха в соответствии с выбранными критериями на различных режимах работы дизеля. Главным образом это относится к давлению наддува  $p_k$ , определяющему расход воздуха через двигатель и, следовательно, коэффициент избытка воздуха, от величины которого, в свою очередь, зависят экономические и экологические показатели дизеля.

САУ турбокомпрессором (ТКР) строится как система программного управления, устанавливающая требуемые значения давления наддува на различных режимах работы дизеля. Программа управления САУ представляет собой массив значений табличных зависимостей управ-

ляемых параметров от параметров, определяющих режим работы двигателя: крутящего момента (нагрузки) и частоты вращения коленчатого вала.

Наибольшая эффективность при использовании системы управления наддувом достигается при оптимизации рабочего процесса дизеля. Процесс оптимизации проводится с целью получения оптимальных значений давления наддува  $p_k$  и соответствующих сигналов на механизм установки лопаток направляющего аппарата турбины  $\varphi_T$  в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля. Критерии оптимизации должны содержать показатели экономичности и токсичности отработавших газов дизеля.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования и оптимизации САУ наддувом автомобильного дизеля 4ЧН 8/7,95 с турбокомпрессором с ТИГ.

Экспериментальные исследования дизеля проводились на четырех скоростных режимах  $n = 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000, 4\ 500$  мин<sup>-1</sup>. На указанных скоростных режимах последовательно задавалась цикловая подача топлива  $g_{ци} = 5, 15, 25, 35$  и  $45$  мг/цикл. На каждом режиме по частоте вращения и расходу топлива устанавливались пять положений направляющих лопаток турбины переменной геометрии  $\varphi_T = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$  в долях от полного открытия. Проводились измерения следующих параметров рабочего процесса дизеля: крутящего момента; удельного эффективного расхода топлива; коэффициента избытка воздуха: выбросов оксидов азота, оксида углерода и углеводородов.

Результаты экспериментальных исследований дизеля использовались в качестве исходных данных для оптимизации давления наддувочного воздуха и позиции направляющих лопаток с целью снижения эффективного расхода топлива и содержания токсичных веществ в отработавших газах.

Для решения задачи оптимизации был выбран один из наиболее эффективных методов иерархической оптимизации — метод свертки, при котором обобщенный критерий оптимальности  $J_o$  формируется в виде суммы:

$$J_o = \sum_{i=1}^k a_i J_i,$$

где  $J_i$  — частные критерии оптимальности;  $a_i$  — весовые коэффициенты [1].

В качестве частных критериев оптимальности были выбраны расход топлива и массовые выбросы оксидов азота, оксида углерода, углеводородов:  $NO_x, CO, CH$ . При этом обобщенный критерий оптимальности принимает следующий вид

$$J_o = a_{G_T} J_{G_T} + a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH} J_{CH},$$

где  $J_{G_T}, J_{NO_x}, J_{CO}, J_{CH}$  — частные критерии оптимальности соответственно по расходу топлива, выбросам  $NO_x, CO, CH$ ;  $a_{G_T}, a_{NO_x}, a_{CO}, a_{CH}$  — весовые коэффициенты соответствующих частных критериев оптимальности.

Обобщенный критерий оптимальности рассчитывался в узловых точках с частотами вращения  $n = 1\ 000; 1\ 500, 2\ 000, 2\ 500, 3\ 000, 3\ 500, 4\ 000, 4\ 500$  мин<sup>-1</sup> и с относительными нагрузками на дизель  $L = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1$  при изменениях позиции лопаток направляющего аппарата турбины в относительных значениях от 0,1 до 0,9. Частные критерии оптимальности  $J_i$  определялись для каждой узловой точки из соотношений:

$$J_{G_{T_i}} = G_{T_i} / G_{T_{io}}; J_{NO_{x_i}} = E_{NO_{x_i}} / E_{NO_{x_{io}}}; J_{CO_i} = E_{CO_i} / E_{CO_{io}}; J_{CH_{x_i}} = E_{CH_{x_i}} / E_{CH_{x_{io}}}$$

где  $G_{T_i}, E_{NO_{x_i}}, E_{CO_i}, E_{CH_{x_i}}$  — расход топлива и массовые выбросы токсичных компонентов на рассматриваемом режиме при текущем значении  $\varphi_T$ ;  $G_{T_{io}}, E_{NO_{x_{io}}}, E_{CO_{io}}, E_{CH_{x_{io}}}$  — те же параметры на этом же режиме при значении  $\varphi_T = 0,1$ , что соответствует закрытому положению направляющих лопаток, при котором момент турбины максимален.

Весовые коэффициенты определялись по соответствию действующим нормам на токсичность отработавших газов дизеля. Весовой коэффициент  $a_{G_T}$  был принят равным единице, а весовые коэффициенты  $a_{NO_x}, a_{CO}, a_{CH}$  определялись в виде отношений действительной эмиссии токсичных компонентов отработав-

ших газов к предельным величинам эмиссии, лимитируемым нормами на токсичность, т. е.

$$a_{NO_x} = e_{NO_x} / e_{NO_x пр}; a_{CO} = e_{CO} / e_{CO пр}; a_{CH_x} = e_{CH_x} / e_{CH_x пр}.$$

В результате процесса оптимизации были найдены оптимальные значения давления наддувочного воздуха  $p_{к.опт}$  и сигнала на исполнительный механизм турбины переменной геометрии  $\varphi_{т.опт}$  на различных режимах, охватывающих все поле режимов работы автомобильного дизеля. На рисунке 1 представлены результаты оптимизации давления наддувочного воздуха  $p_{к.опт}$  в зависимости от относительной нагрузки  $L$  и частоты вращения вала дизеля  $n$ , на рис. 2 — аналогичные результаты оптимизации сигналов на исполнительный механизм турбины  $\varphi_{т.опт}$ , соответствующих оптимальным значениям давления наддува.

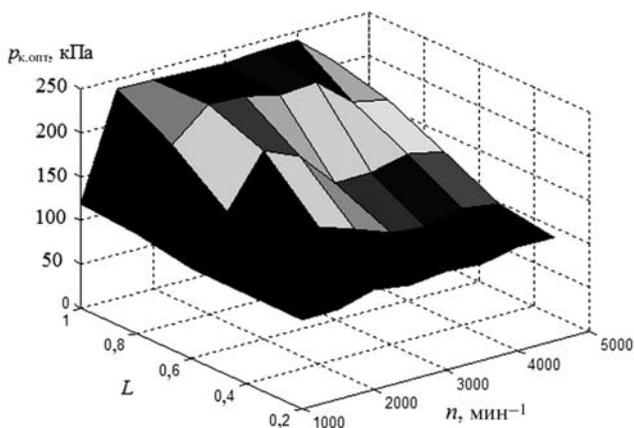


Рис. 1. Оптимальные значения давления наддува

Для установки полученных значений давления воздуха при работе дизеля используется система программного управления наддувом дизеля с ТИГ. Для достижения максимальной эффективности работы дизеля система управления давлением наддувочного воздуха должна устанавливать определенное давление, оптимальное для режима работы, обеспечивающего минимальные расход топлива и выделения токсичных веществ. Также необходимо обеспечить максимальное быстродействие переходных процессов между режимами работы дизеля.

Объектом регулирования (ОР) САУ является турбина, регулируемым параметром — давле-

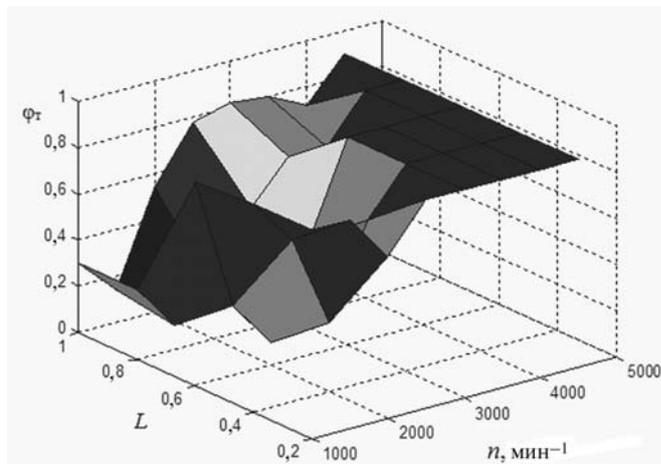


Рис. 2. Оптимальные значения сигнала на исполнительный механизм турбины изменяемой геометрии

ние наддувочного воздуха, исполнительным устройством — механизм изменяемой геометрии турбины, датчиками — датчики частоты вращения дизеля и давления наддувочного воздуха. Изменение положения педали акселератора является внешним сигналом управления на систему.

Функциональная схема САУ приведена на рис. 3. САУ включает в себя два связанных контура: разомкнутый контур программного управления положением лопаток направляющего аппарата турбины; замкнутый контур регулирования давления наддува.

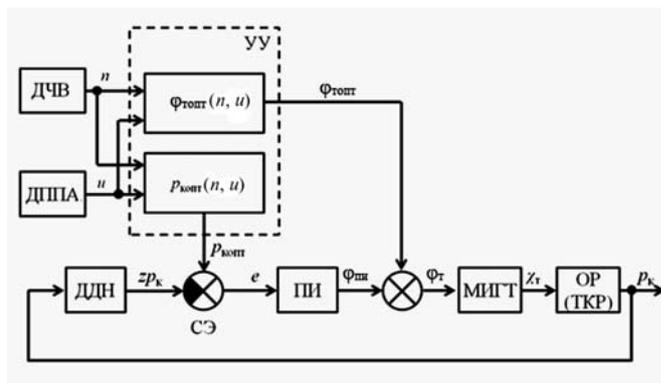


Рис. 3. Функциональная схема САУ

В управляющем устройстве (УУ) системы из входных сигналов датчиков частоты вращения вала дизеля (ДЧВ)  $n$  и положения педали акселератора (ДППА)  $u$  формируются управляющие воздействия:  $\varphi_{т.опт}$  — для контура управления положением лопаток направляющего аппарата

турбины и  $p_{к.опт}$  — для контура управления давлением наддува. Оба контура управления воздействуют на исполнительное устройство САУ — механизм установки лопаток направляющего аппарата турбины (механизм изменяемой геометрии турбины — МИГТ).

Контур управления положением направляющих лопаток турбины является контуром предварительного управления и введен в САУ для повышения быстродействия системы. В нем по сигналам ДЧВ и ДППА для данного режима определяется записанное в матрице значение положения лопаток и соответствующий сигнал посылается на МИГТ. Контур выполнен как разомкнутая система управления и обеспечивает высокое быстродействие САУ на начальном этапе процесса управления, поскольку на его работу не оказывает влияния инерционность турбокомпрессора, которая замедляет функционирование основного замкнутого контура установки давления наддува.

В контуре установки давления наддува по сигналам ДЧВ и ДППА по матрице оптимизированных значений давления наддува для текущего режима работы дизеля определяется требуемое значение давления воздуха  $p_{к.опт}$  и выполняется стабилизация этого значения. Контур выполнен как замкнутая система регулирования с обратной связью. На сравнивающем элементе (СЭ) регулятора определяется отклонение действительного значения давления воздуха в виде сигнала с датчика давления наддува (ДДН)  $p_k$  от сигнала управления  $p_{к.опт}$ , определенного по матрице оптимизированных значений —  $e = p_{к.опт} - p_k$ . Из сигнала отклонения в соответствии с законом регулирования в регуляторе формируется сигнал изменения положения лопаток направляющего аппарата турбины, который совместно с сигналом, поступающим из разомкнутого контура установки лопаток, подается на МИГТ, устанавливающий соответствующий угол лопаток направляющего аппарата турбины. Замкнутый контур

обеспечивает точную установку оптимизированных давлений наддува на различных режимах работы дизеля.

В настоящее время наибольшее распространение в САУ теплоэнергетическими установками получил пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования. Для системы управления давлением наддува основным входным сигналом является управляющий сигнал на механизм МИГТ и цель работы САУ заключается в установке требуемого значения управляющего сигнала в виде положения направляющих лопаток или давления наддува. В такой САУ дифференциальная составляющая закона регулирования замедляет переходный процесс на начальном этапе процесса регулирования. Поэтому преобразование сигнала отклонения в замкнутом контуре установки давления наддува осуществляется по пропорционально-интегральному (ПИ) закону регулирования:

$$\varphi_{\text{пи}}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt,$$

где  $k_p$  и  $k_i$  — коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих закона регулирования соответственно.

Результирующий сигнал, поступающий на исполнительный механизм направляющих лопаток турбины переменной геометрии, представляет собой сумму  $\varphi_t = \varphi_{\text{пи}} + \varphi_{\text{опт}}$ . Коэффициенты закона регулирования определены путем оптимизации процессов управления по критериям динамического качества методом полунатурного моделирования.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность САУ давлением наддува.

#### Литература

1. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

Статья поступила в редакцию 09.02.2012