

Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания

А.А. Щеглов

Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

Аннотация. Рассмотрены современные изобретения в области автоматизированных систем управления двигателем по результатам патентного поиска. Описано предлагаемое автором устройство регулирования двигателя.

Abstract. The paper contains a basic review of modern inventions in diesel engine automatic control systems. The regulating device for the diesel engine offered by the author has been described.

1. Введение

К одной из наиболее ответственных областей автоматизации на флоте относятся автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками (АСУ СЭУ), объединяющие системы управления главными и вспомогательными механизмами судна.

Современные АСУ СЭУ должны удовлетворять нормативным требованиям международных классификационных обществ по основным характеристикам, связанным с жизнеобеспечением судна (надежность, быстрота реагирования и т.д.) при выполнении следующего объема функций:

- сбор и обработка первичной информации от устройств нижнего уровня;
- контроль технологических нормативов и автоматизация процесса их поддержания;
- регистрация сигналов и управление в аварийных ситуациях;
- визуализация информации в виде графиков, гистограмм, трендов и т.п.;
- автоматическая генерация отчетной информации.

За последние годы на отечественном и зарубежном флоте появилось значительное количество судов, автоматика которых широко ориентирована на использование современных микропроцессорных технологий (Лепский и др., 2004; Щеглов, 2004).

Интенсивное развитие микропроцессорных систем позволило начать процесс децентрализации процесса управления и расширения области применения локальных систем управления, с сохранением "интеллектуального" уровня, доступного ранее только компьютерам центрального поста управления. Основным направлением исследований в этой области является создание способа оптимизации управления технологическими процессами энергетических установок, обеспечивающего получение технического результата, состоящего в улучшении эксплуатационных характеристик оборудования, а также уменьшение числа обслуживающего персонала при высокой надежности функционирования.

Совершенствование процесса регулирования частоты вращения коленчатого вала судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС) является одной из наиболее интенсивно развивающихся областей судовой автоматики. Технологически это выражается в постепенном вытеснении механических регуляторов актуаторами и регулятор-актуаторами, которые осуществляют процесс управления с использованием дополнительного сигнала, вырабатываемого микропроцессорным контроллером, отвечающим за работу двигателя.

2. Современные способы и устройства регулирования частоты вращения СДВС

Современные изобретения в области управления двигателем внутреннего сгорания очень широко представлены немецкими, американскими и российскими патентами. На данный момент существует достаточно большое количество разработок в этой области, что доказывает ее актуальность. Результаты поиска по российским и иностранным патентным базам подтверждают этот факт. Также необходимо отметить, что большинство крупных двигателестроительных компаний, таких как MAN, Wartsila и др., выбрали совершенствование автоматизированных систем приоритетным направлением.

Патентный поиск был произведен по базе Роспатента, а также по реферативным журналам ВИНТИ. Ниже в сравнительной табл. 1 отражены особенности некоторых существующих изобретений в рамках автоматизированных систем управления двигателем внутреннего сгорания, а также особенности предлагаемого устройства и его прототипа (*Официальный сайт..., Сайт ВИНТИ*).

Таблица 1. Особенности изобретений

Общая информация и основные особенности изобретения	Известные (управляющие) параметры	Определяемые (управляемые) параметры
<p>Голубев В.И., Беляев Б.В., Деревенских В.Ф., Павутницкий Ю.В., Лямин А.Е. Патент РФ № 2157463. Дата публикации: 2000.10.10 Во всем диапазоне частоты вращения ДВС угол опережения зажигания изменяют в зависимости от положения максимума давления на индикаторной диаграмме ДВС и от состава топливной смеси, а также корректируют состав топливной смеси с целью поддержания его заданного значения. Технический результат – повышение точности работы системы управления двигателем и увеличение ее быстродействия</p>	<p>1. Угол поворота коленчатого вала, соответствующий росту давления в цилиндре ДВС при сгорании 2. Положение коленчатого вала ДВС, соответствующее максимуму давления в цилиндре</p>	<p>1. Состав топливной смеси 2. Максимальная эффективность преобразования тепловой энергии в механическую</p>
<p>Шевяков Г.Е. Патент РФ № 2058495. Дата публикации: 1996.04.20 Применяется следящий принцип управления, который позволяет не измерять абсолютные значения параметров, а только следить за их изменениями, что упрощает схему и принцип работы устройства, повышает точность и эффективность работы системы. Последовательно отслеживают сигналы обратной связи с датчиков режима работы двигателя и автоматически корректируют значения управляющих параметров. Отслеживание сигналов обратной связи производится по их приращениям и знаку. Корректировка управляющих параметров в ту или иную сторону производится в зависимости от знака до тех пор, пока величины приращения не станут близкими к нулю</p>	<p>1. Коэффициент избытка воздуха в топливо-воздушной смеси 2. Угол опережения зажигания</p>	<p>1. Угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя 2. Изменение приращений амплитуды, например, давления в камере сгорания по фазе вращения коленчатого вала</p>
<p>Роберт Бош, Франк Майер, Томас Блайе и др. Дата публикации: 2004.02.10. Номер публикации: 2002120461. Регистрационный номер заявки 2002120461/06 На основании, по меньшей мере, одной управляющей величины и, по меньшей мере, одной измеряемой величины, характеризующей состояние окружающего воздуха, с помощью, по меньшей мере, одной модели определяют, по меньшей мере, одну величину, характеризующую параметры системы впуска воздуха</p>	<p>1. Параметры окружающей среды (температура, давление) 2. Расход топлива</p>	<p>1. Количество воздуха, проходящего через компрессор, его температура 2. Температура выпускных газов</p>
<p>Пинский Ф.И., Пинский И.Ф. Патент РФ № 4446725/06. Дата публикации: 1988.06.24 Применяется метод кратковременного отключения подачи топлива последовательно в каждый цилиндр и измерения величины изменения частоты вращения вала двигателя. Позволяет повысить точность управления распределением нагрузки двигателя по цилиндрам</p>	<p>Положение и частота вращения колен. вала двигателя, а также положение его распредел. вала при последовательном отключении подачи топлива по цилиндрам</p>	<p>Значение фактической нагрузки каждого цилиндра</p>
<p>Кочуров В.И., Минчин М.А., Бабич В.А. Патент РФ № 4723856/06. Дата публикации: 1989.07.26 Используется метод регулирования по наименьшему сигналу. При подключении нескольких каналов регулирования в качестве ведущего выбирается сигнал с наименьшим отклонением от заданной величины. Корректировка по остальным каналам происходит в зависимости от величины рассогласования между ведущим и данным каналом</p>	<p>Способ предполагается использовать при совместной работе нескольких регуляторов, подключенных к общему селектору. Может использоваться для корректировки нагрузки на двигатели на судах с электродвижением</p>	
<p>Прототип предлагаемого устройства. Русakov Ю.М., Барщенков В.И., Удальцов А.Б. Патент Российской Федерации № 4194746/25-06 Дата публикации: 1987.02.13 Устройство управления на основе микропроцессора, позволяющее повысить топливную экономичность ДВС за счет повышения точности корректировки топливоподачи по параметрам нагрузки</p>	<p>1. Частота вращения коленчатого вала. 2. Давление наддува 3. Температура охлаждающей жидкости</p>	<p>1. Скоростной режим работы ДВС 2. Нагрузка 3. Температурный режим работы ДВС</p>
<p>Предлагаемое устройство регулирования. Используется адаптивный метод управления, при котором динамические свойства объекта характеризуются самим объектом. Причем параметры частоты вращения двигателя и обороты ГТН используются для регулировки и корректировки топливоподачи, а параметр температуры выпускных газов – как характеристика технического состояния двигателя</p>	<p>1. Частота вращения коленчатого вала 2. Обороты ГТН 3. Температура выпускных газов</p>	<p>1. Мощность двигателя 2. Рассогласование реальной мощности и требуемой для данного режима работы 3. Процесс сгорания</p>

3. Выбор параметров для коррекции частоты вращения СДВС

Базовым параметром, используемым в механических регуляторах, является частота вращения коленчатого вала двигателя ($W_{ДВ}$), являющаяся универсальным показателем мощности двигателя.

Особенность рыболовных судов заключается в несоизмеримо большей длительности нестационарных режимов работы главного двигателя, чем на судах транспортного флота. Очевидно, что в этом случае целесообразно попытаться ввести в контур регулирования **дополнительный параметр**, отражающий особенности динамики эксплуатационных режимов ГД рыболовного судна.

Первым критерием выбора такого параметра является наличие аппаратной поддержки, т.е. наличие на судне технических средств, позволяющих осуществлять контроль данного параметра.

Предварительно были выбраны два параметра, характеризующие нагрузку двигателя, но отражающие различные особенности состояния СДВС:

- частота вращения газотурбоагрегата (ГТА) ($W_{ГТА}$), которую можно использовать для контроля рассогласования реальной и требуемой мощности ГД на задаваемом режиме работы;
- температура отработавших газов (T_G), позволяющая контролировать соотношение топливо-воздух и техническое состояние двигателя.

Для практической оценки возможности использования данных показателей в системе регулирования топливоподачи был проведен эксперимент, целью которого являлось установление однозначной взаимосвязи расхода топлива с $W_{ГТА}$ и T_G .

Практические исследования проводились на судне, принадлежащем ОАО "МТФ" М-0001 "А. Косарев", в период с 09.09.2004 по 08.04.2005 г. В качестве метода был применен пассивный эксперимент, поскольку на судне в рабочих условиях невозможна эксплуатация главного двигателя в определенных диапазонах нагрузок (слишком малых, выше номинальной).

В течение рейса снимались параметры температуры выхлопных газов по цилиндрам и обороты турбоагрегата (табл. 2).

Таблица 2. Выдержка из протокола испытаний

Время, час, мин	Обороты ГТН, об/мин	Температура выхлопных газов по цилиндрам, t °C						Распределение нагрузки в зависимости от $W_{ГТА}$ ($N/N_{ном}$)	Распределение нагрузки по цилиндрам в зависимости от температуры ($N/N_{ном}$)	Часовой расход топлива	
		№1	№2	№3	№4	№5	№6			$G_i = f(N_{ГТА})$	$G_i = f(T_G)$
0,01	13500	375	353	360	348	360	357	0,86	0,964393	442,5	412,8
0,02	13500	375	353	360	348	360	357	0,86	0,964393	442,5	412,8
6,47	15750	395	383	390	380	395	385	0,93	0,979905	474,8	418,7

В результате обработки данных были получены следующие зависимости:

- распределение нагрузки по цилиндрам в зависимости от температуры для каждого часа и среднее ее значение;
- распределение нагрузки в зависимости от оборотов турбины.

По ним была определена топливная характеристика, т.е. зависимость часового расхода топлива от относительного значения нагрузки двигателя:

$$y = 0,04x^2 + 0,8231x + 0,142,$$

где y – часовой расход топлива; x – относительное значение текущей нагрузки двигателя.

В соответствии с полученной зависимостью был произведен контрольный расчет расхода топлива и оценка нагрузки двигателя за контрольный период $T_p = 3014$ часов. Результаты расчета:

- часовой расход топлива при номинальной нагрузке двигателя – 528,9 кг/час;
- отклонение нагрузки двигателя, определенное по оборотам турбины, – 0,064301;
- отклонение нагрузки двигателя, определенное по температуре выхлопных газов, – 0,011985.

Таким образом, полученный результат позволяет **без индцирования рабочего процесса** получить контрольные значения рейсового расхода топлива:

- по оборотам турбины – 1080 т;
- по температуре выхлопных газов – 1067 т,

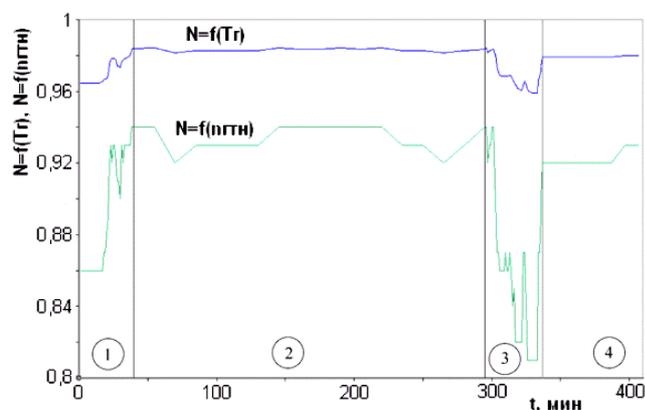
причем расхождение показателей не превосходит 1,5 %, что по качеству определения результатов может быть сопоставлено с измерительным прибором 1-го класса.

Результаты эксперимента подтвердили, что принятые для рассмотрения параметры отражают **реальный процесс потребления топлива СДВС** и могут быть использованы при формировании алгоритма топливоподачи.

Сопоставительный анализ инерционности $W_{ГТН}$ и $T_{Г}$ (см. рис. 1) позволяет утверждать, что при изменении режима двигателя для процесса корректировки топливоподачи целесообразней использовать частоту вращения ГТН, а температуру выпускных газов можно принять в качестве ограничительной характеристики и критерия окончания переходного процесса.

Кроме того, степень рассогласования контрольных показателей удельного расхода топлива по двум каналам позволяет судить о техническом состоянии двигателя, т.е. позволяет производить оперативную диагностику контролируемого механизма.

Рис. 1. Распределение нагрузки на различных режимах (в зависимости от регулирующих параметров):
1 – режим постановки трала;
2 – режим траления;
3 – режим подъема трала;
4 – режим полного хода



4. Предлагаемое устройство регулирования частоты вращения СДВС

Типовые регуляторы класса UG-40 TL осуществляют регулирование частоты вращения СДВС в функции от угловой частоты вращения с учетом двух ограничений: по моменту, т.е. несоответствию реальной и заданной частоты вращения и по давлению наддува, т.е. несоответствию давления наддува заданному уровню топливоподачи.

В предлагаемом устройстве управления ограничитель по моменту заменен ограничителем по частоте вращения ГТН, а ограничитель по давлению наддува – ограничителем по температуре выхлопных газов.

Новое устройство управления отражает новую концепцию регулирования, т.к. ее реализация невозможна без использования микропроцессора, осуществляющего сбор и обработку исходных данных, которые ранее было невозможно использовать в традиционных системах регулирования СДВС.

В основу предлагаемой системы автоматического управления положен типовой регулятор частоты вращения, отличающийся тем, что коррекция рабочего режима осуществляется с помощью микропроцессора, который вырабатывает сигнал управления с учетом частоты вращения вала газотурбонагнетателя ($W_{ГТН}$) и температуры отработавших газов ($T_{Г}$).

Изобретение относится к области автоматического регулирования эксплуатационных режимов судовых энергетических установок и может быть использовано для создания системы управления судовым двигателем внутреннего сгорания рыбопромыслового судна.

Цель изобретения – повышение эффективности топливоиспользования, точности и оперативности регулирования двигателя на различных эксплуатационных режимах, а также использование системы управления для диагностирования технического состояния механизма.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является устройство (по патенту: 4194746/25-06), содержащее импульсный датчик частоты вращения двигателя, датчик давления наддува, датчик крутящего момента, датчик температуры охлаждающей жидкости, формирователь импульсов, синхронизирующий замкнутый контур, дифференциатор, задатчик режимов, микропроцессор (МП), два сумматора, шаговый электродвигатель. Данное устройство позволяет повысить топливную экономичность двигателя за счет повышения точности коррекции топливоподачи по параметрам нагрузки.

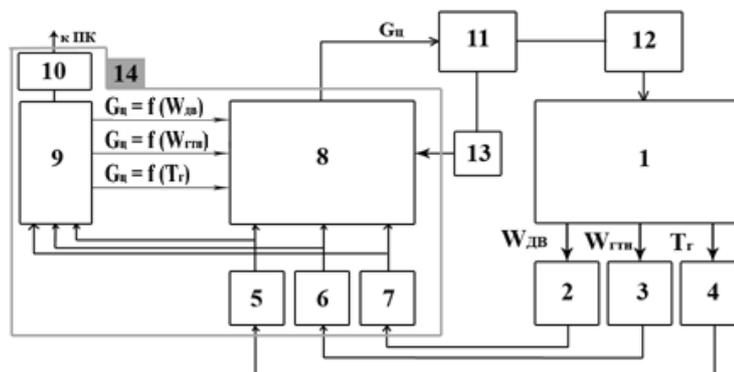
Однако устройство, принятое за прототип, обладает рядом недостатков:

1. При изменении эксплуатационного режима главного двигателя рыбопромыслового судна (ходовой, траление, выборка трала) использование только заявленных датчиков в системе регулирования топливоподачи приводит к относительно высокой ошибке при задании режима потребления топлива (до 10-15 %).

2. Система обработки управляющих данных технологически устарела. Современная техническая база (микропроцессорные системы управления) позволяет заменить предлагаемые в прототипе изобретения, такие элементы как формирователь импульсов, синхронизирующий замкнутый контур, дифференциатор, задатчик режимов, микропроцессор, сумматоры на блок управления, содержащий микропроцессор, аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и запоминающее устройство, включающий в себя те же функции, что вышеперечисленные элементы.

Рис. 1. Блок-схема устройства управления.

1 – ДВС; 2 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 3 – датчик частоты вращения ГТН; 4 – датчик температуры выхлопных газов; 5, 6, 7 – АЦП; 8 – микропроцессор; 9 – запоминающее устройство; 10 – модуль подключения к ПК; 11 – шаговый электродвигатель (ШД); 12 – рейка топливных насосов; 13 – датчик положения выходного вала ШД; 14 – блок управления



Предлагаемое устройство позволяет повысить эффективность и быстродействие процессов управления двигателем, а также дополнительно включить функцию диагностирования технического состояния дизеля.

На рис. 2 приведена блок-схема предлагаемого устройства регулирования частоты вращения СДВС. Устройство содержит датчик 2 частоты вращения вала двигателя 1, датчик 3 частоты вращения ГТН, датчик 4 температуры выхлопных газов по цилиндрам. Выходы вышеперечисленных датчиков соединены с АЦП 5,6,7, которые, соответственно, подключены к трем входам микропроцессора 8 и к трем входам запоминающего устройства 9. Запоминающее устройство 9 тремя выходами соединено с микропроцессором 8 и одним выходом – с модулем подключения к персональному компьютеру (ПК). Микропроцессор 8 на выходе подключен к шаговому электродвигателю (ШД) 11, выходной вал которого соединен с рейкой 12 топливных насосов (РТН). Также имеется датчик 13 положения выходного вала шагового электродвигателя, который на входе соединен с ШД 11, а на выходе – с микропроцессором 8. Микропроцессор 8, запоминающее устройство 9, модуль подключения к персональному компьютеру 10, АЦП 5,6,7 объединены в один корпус – блок управления 14.

Запоминающее устройство 9 содержит в памяти набор базовых режимов двигателя и характеризующих их значений управляющих параметров. Базовые режимы описаны в виде зависимостей: $G_{ц} = f(W_{дв})$ – цикловой подачи топлива от частоты вращения коленчатого вала ДВС, $G_{ц} = f(W_{ГТН})$ – цикловой подачи топлива от частоты вращения ГТН, $G_{ц} = f(T_{г})$ – цикловой подачи топлива от температуры выхлопных газов. Указанные функции определяют количество подаваемого в двигатель топлива в зависимости от изменения управляющих параметров, характеризующих скоростной режим, нагрузку и температурный режим. Кроме того, в запоминающем устройстве 9 часть памяти зарезервирована для фиксирования параметров работы ДВС и последующей генерации отчетов о техническом состоянии механизма.

Микропроцессор 8 сравнивает фактические значения управляющих параметров с базовыми значениями, полученными от запоминающего устройства 9, и вырабатывает соответствующий управляющий сигнал на корректировку топливоподачи.

Также блок управления 14 включает в себя АЦП 5,6,7 для обеспечения совместимости с датчиками 2,3,4.

В качестве микропроцессора может использоваться командный модуль стандарта VXi "Hewlett-Packard" HP E1306A с процессором M68000, 8 МГц, ОЗУ до 2 МБ и интерфейсами связи RS-232 и GP-IB.

В качестве запоминающего устройства 9 рекомендуется использовать модуль памяти со встроенными накопителями (HP E1562B, 2×2,1 Гб) и портами SCSI-2 для внешнего обмена данными.

Аналого-цифровые преобразователи 5,6,7 – модули с разрешением 16 бит и скоростью преобразования до 400 кГц с индивидуально программируемыми встроенными усилителями и фильтрами (модули фирм ANALOGIC – DBS 8700,8701 и Hewlett-Packard – HP E1313A, HP E1413A) (Лепский и др., 2004).

В качестве датчика оборотов ГТН 3 и оборотов двигателя 2 используется 2-канальный модуль счетчика/частотомера, например, I – 7080.

В качестве датчика температуры газов – 4-8-канальный модуль ввода сигнала с термопары типа J, K, T, E, R, S, B, N, C с изоляцией, например, I – 7018.

Система работает следующим образом.

При изменении режима работы ДВС изменяется частота вращения коленчатого вала двигателя ($W_{дв}$), контролируемая датчиком 2, и частота вращения ГТН ($W_{ГТН}$), контролируемая датчиком 3.

Сигналы с упомянутых датчиков, а также с датчика 4 температуры (T_r) выхлопных газов, направляются через АЦП (которые преобразовывают их в цифровую форму) на запоминающее устройство 9 и микропроцессор 8.

Микропроцессор 8 выбирает наиболее близкий базовый режим с характеризующими его зависимостями $G_{ц} = f(W_{дв})$, $G_{ц} = f(W_{гтн})$ и $G_{ц} = f(T_r)$.

На основании сигнала ($W_{дв}$) и зависимости $G_{ц} = f(W_{дв})$ микропроцессор 8 рассчитывает необходимую цикловую подачу топлива для поддержания заданной частоты вращения.

На основании сигнала ($W_{гтн}$) и зависимости $G_{ц} = f(W_{гтн})$ микропроцессор производит корректировку цикловой подачи топлива в соответствии с отклонением реальной мощности от требуемой для данного режима работы.

Затем с выхода микропроцессора 8 подается управляющий сигнал на ШД 11, который осуществляет позиционирование РТН 12. Положение РТН 12 непрерывно контролируется с помощью обратной связи, включающей датчик 13 положения выходного вала ШД 11.

Сигнал (T_r) и зависимость $G_{ц} = f(T_r)$ являются верхней ограничительной характеристикой, на основании которой микропроцессор 8 производит корректировку подачи топлива в соответствии с изменением температурного режима.

Кроме того, запоминающее устройство 9 фиксирует в памяти значения параметров $W_{гтн}$ и T_r с последующей возможностью подключения к компьютеру через модуль 10 для проведения диагностики механизма и определения его технического состояния.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет повысить точность и быстроту регулирования двигателя при переходах на различные эксплуатационные режимы и реализует систему управления, позволяющую диагностировать техническое состояние механизма.

5. Заключение

Проведенные исследования позволяют утверждать, что специфика работы энергетических установок рыбопромысловых судов, а именно, несоизмеримая с транспортными судами длительность работы на нестационарных (промысловых) режимах (до 50 %), требует создания принципиально других регуляторов частоты вращения главных двигателей.

Специфика предлагаемой схемы регулирования связана не с поддержанием частоты вращения на ходовом режиме, а с обеспечением режима оптимального топливоиспользования минимум на трех эксплуатационных режимах: ходовом, траления и подъема трала, т.к. топливная составляющая играет основную роль в формировании цены на конечный продукт рыболовного судна.

Для решения поставленной задачи предлагается ориентироваться на поддержание соответствия между основными паспортными характеристиками двигателя, снимаемыми при сдаче его в эксплуатацию, т.е. использовать метод управления подачей топлива на базе эталонной модели технологического процесса. При этом использование современной микропроцессорной базы предоставляет службам эксплуатации широкие возможности для оперативного контроля технического состояния двигателя в течение рейса.

В качестве основных параметров управления предлагается использовать частоту вращения двигателя, частоту вращения газотурбонагнетателя и температуру выхлопных газов двигателя, а регулирование осуществлять в функции от сигнала несоответствия реальных и паспортных данных, вырабатываемого микропроцессором.

Литература

Лепский А.Г., Цветков В.В., Щеглов А.А. Основные направления развития систем комплексной автоматизации на флоте. *Вестник МГТУ*, т.7, № 3, с.409-418, 2004.

Официальный сайт Роспатента. Изобретения. Патенты. [электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.fips.ru>, свободный. – загл. с экрана.

Сайт ВИНТИ. [электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.viniti.ru>, свободный. – загл. с экрана.

Щеглов А.А. Оценка эффективности топливоиспользования СДВС по параметрам газовыхлопного тракта. *Материалы Международной научно-технической конференции МГТУ "Наука и образование - 2004". В 6 ч. Мурманск, МГТУ, ч.5, с.225-228, 2004.*