

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.113

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.;

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.;

В. Н. Тимофеев,
канд. техн. наук, доц.

СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

CONTEMPORARY CONCEPTION OF REGULATION IN COOLING SYSTEM OF SHIP'S DIESEL ENGINES

Статья посвящена проблеме обеспечения оптимального охлаждения судовых дизелей, которое обеспечивает требуемые экономические, ресурсные и экологические показатели их работы на различных эксплуатационных режимах. Проведенные исследования показывают, что для современных дизелей с высоким уровнем форсированности необходимо осуществлять автоматическое регулирование температуры охлаждающей жидкости, давления в контуре охлаждения и физико-химических свойств охлаждающей жидкости. Приведены функциональные и структурные схемы систем автоматического регулирования охлаждения дизеля. Сформулированы основные принципы регулирования охлаждения судовых дизелей. Оптимальное тепловое состояние обеспечивается связанным регулированием параметров охлаждения и наддува. Отмечается, что системы автоматического регулирования должны базироваться на современных датчиках параметров и свойств охлаждающей жидкости, программируемых микропроцессорных блоках управления и исполнительных устройствах с электромагнитным управлением. Актуальной задачей является разработка управляющих программ для систем регулирования охлаждения.

The article is devoted to the problem of ensuring of optimal cooling for ship's diesel engines, which is necessary for required economical, ecological and resources indexes of engine's function on different exploitation regimes. Investigations, which were conducted, showed that for modern diesel engines with high level of forces automatic regulation of temperature of cooling liquid, pressure in cooling system and properties of cooling liquid is necessary. In the article function and structure schemes of system of automatic regulation of diesel engines' cooling are demonstrated. Main principles of cooling regulation are formulated in the article. Optimal heat conduction of diesel engines is ensured by connected regulation of parameters of cooling system and supercharge system. Systems of the automatic regulation must be based on modern sensitive elements for fixing temperature, pressure and properties of cooling liquid, microprocessor block of management with management program and executive mechanism with electromagnetic management. Creation of management program for regulation cooling system is a actual scientific problem.

Ключевые слова: судовые дизели, параметры охлаждения, автоматическое регулирование, качество регулирования, функциональные и структурные схемы, принципы регулирования охлаждения.

Key words: ship's diesel engines, parameters of cooling, automatic regulation, quality of regulation, function and structure schemes, principles of cooling regulation.

Т ЕПЛОВОЕ состояние судового дизеля, обеспечиваемое эффективной работой системы охлаждения, оказывает определяющее влияние на его технико-экономические показатели, такие как надежность, топливная экономичность и экологическая безопасность [1] – [4]. Важнейшее значение имеет тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, которое

определяет качество протекания рабочего цикла, условия смазывания этих деталей, величину механических потерь, расход масла на угар и интенсивность изнашивания в сопряжении *втулка цилиндра – поршневой комплект*, скорость газовой коррозии и ресурс выпускных клапанов, вероятность образования трещин в крышках и втулках цилиндров, днищах поршней, интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений омываемых охлаждающей жидкостью поверхностей втулок и блоков цилиндров и накипеобразования в рубашке охлаждения.

Дизели, эксплуатируемые в составе судовых энергетических установок (СЭУ) судов, значительную часть времени работают на неустановившихся и переменных режимах. Наиболее характерными являются переходные режимы, связанные с многочисленными реверсами и маневрированием, для двигателей судов, работающих в ледовых условиях, судов внутреннего плавания при прохождении сложных участков, гидроузлов и каналов, а также судов портового флота [5]. Во время неустановившихся режимов работы и переходных процессов температура наиболее теплонагруженных деталей цилиндропоршневой группы претерпевает значительные изменения, а температура охлаждающей жидкости остается при этом практически неизменной. Имеет место так называемая *тепловая инерционность*. Рабочие процессы при неустановившихся и переходных режимах протекают при температуре стенок камеры сгорания, существенно отличающейся от значений, характерных для установившегося режима номинальной мощности, который является расчетным. При резких изменениях режимов работы дизеля локальная температура его деталей может превышать температуру, характерную для режима номинальной мощности. Неустановившееся температурное состояние деталей сопровождается ростом разности температур на их поверхностях и увеличением температурных напряжений. Данная проблема особенно актуальна для современных и перспективных судовых дизелей, имеющих высокий уровень форсированности [6], в которых тепловые нагрузки и температурные напряжения становятся сопоставимыми с механическими, во многих случаях лимитируя надежность двигателей.

Для решения указанной проблемы необходимо обеспечить оптимальный температурный уровень судового дизеля не только на установившихся режимах работы, но и на переходных, неустановившихся режимах. Оптимальным следует считать такой температурный уровень, при котором материалы деталей сохраняют свои прочностные свойства, моторные масла сохраняют высокую смазывающую и несущую способность, а потери теплоты через систему охлаждения минимальны. На работе двигателя отрицательно сказывается как недостаточное, так и излишнее охлаждение. Перегрев двигателя вызывает ухудшение наполнения цилиндров воздушным зарядом, неполное сгорание топлива и его повышенный расход, нарушение условий жидкостного трения, возникновение повышенных износов и задиров трущихся поверхностей в узлах трения, повышенный расход масла на угар, снижение прочностных свойств материалов и появление термоусталостных разрушений. Переохлаждение двигателя приводит к чрезмерному повышению вязкости масла и, соответственно, к возрастанию механических потерь, снижению эффективного КПД двигателя, а также к ухудшению смесеобразования и воспламенения, переносу процесса сгорания на линию расширения и повышенным расходам топлива. Жидкостные системы охлаждения призваны обеспечивать надежную работу двигателей в течение продолжительного времени при максимальной температуре рабочего цикла, достигающей в современных двигателях 1700 – 2700 °С.

Конструкция систем охлаждения и их отдельных элементов должна обеспечивать возможность гибкого регулирования теплоотвода и минимальные затраты энергии, необходимые для циркуляции теплоносителя. Очевидно, что для современных и перспективных судовых дизелей, к которым предъявляются достаточно высокие требования как по экономическим, так и по ресурсным показателям, обеспечение оптимального температурного уровня возможно лишь путем качественного автоматического регулирования теплонапряженного состояний двигателя и режимов охлаждения [7].

Влияние факторов, оказывающих влияние на теплонапряженное состояние дизеля, может быть представлено в виде схемы, приведенной на рис. 1. Для современного уровня двигателестроения наиболее рациональным и целесообразным является совершенствование системы авто-

матического регулирования теплового состояния дизеля (САРТ) за счет воздействия на режимы охлаждения двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Функционирование систем охлаждения судовых дизелей целесообразно характеризовать двумя группами показателей: *режимными*, такими как температура охлаждающей жидкости, ее расход, перепад температур в контурах охлаждения, давление в системе охлаждения, и *водно-химическими*, характеризующими физические и химические свойства охлаждающей жидкости [8]. Влияние физико-химических и теплофизических свойств охлаждающих жидкостей на ресурсные, экономические и экологические показатели работы дизелей является крайне важным фактором [9], [10]. В связи с этим современная концепция регулирования охлаждения должна предусматривать как автоматическое регулирование режимных показателей, так и регулирование водно-химических параметров охлаждения.

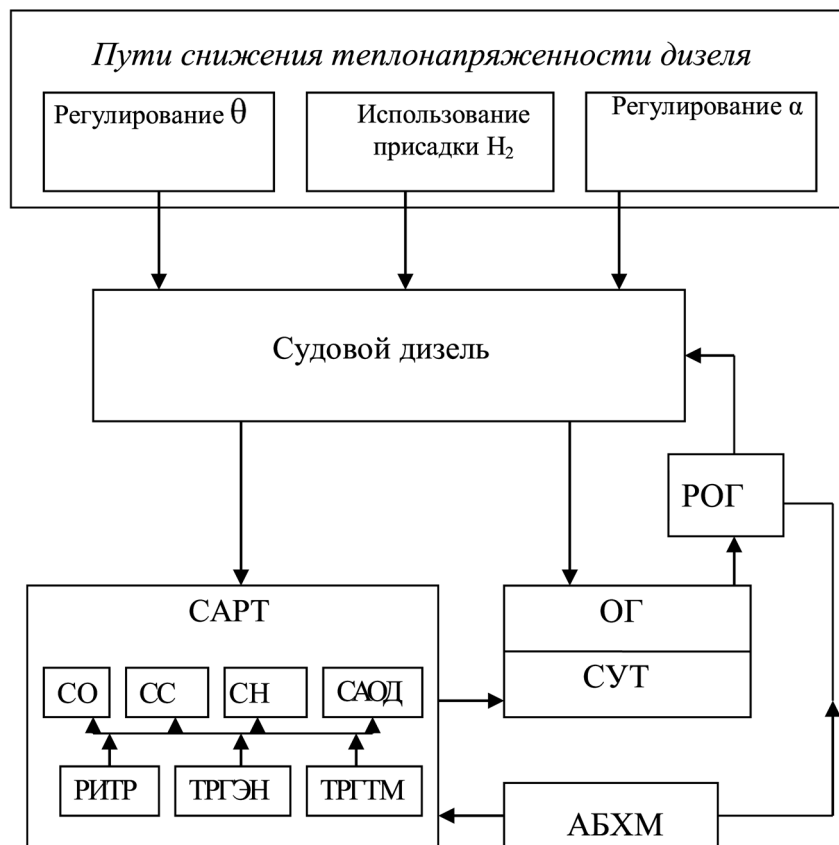


Рис. 1. Факторы, определяющие температурное и теплонапряженное состояние дизеля:

θ – угол опережения впрыскивания топлива;

H_2 – водород в виде присадки; α – коэффициент избытка воздуха

Условные обозначения: РОГ – «холодная» рециркуляция ОГ; ОГ – отработавшие газы;

СУТ – система утилизации теплоты; АБХМ – абсорбционная холодильная машина;

САРТ – система автоматического регулирования теплового состояния ДВС:

СО – система охлаждения; СС – система смазки; СН – система наддува;

САОД – система аварийной остановки дизеля; РИТР – релейно-импульсный терморегулятор;

ТРГЭН – терморегулятор с электронагревателем;

ТРГТМ – терморегулятор с термоэлектрическим модулем

Преимущества, которые могут быть получены от внедрения систем автоматического регулирования охлаждения в судовых дизельных установках, сводятся к следующему.

1. Обслуживающий персонал освобождается от непосредственного наблюдения за режимными и водно-химическими параметрами в системах дизеля и от труда, связанного с ручным управлением.

2. Автоматизированное управление способно обеспечить работу судового дизеля при оптимальных (квазиоптимальных) параметрах охлаждения.

Таким образом, проблемами автоматического регулирования температурного состояния ДВС являются задачи повышения точности и качества процесса регулирования. При этом следует отметить, что при синтезе систем требуется добиться не просто заданных показателей качества, таких как точность, запас устойчивости, быстродействие, приемлемый характер переходных процессов и др., но и соответствия параметров охлаждения режиму работы двигателя.

Синтез структуры управляющего устройства следует выполнять в два этапа. На первом этапе определяется оптимальный алгоритм регулирования, на втором – осуществляется его техническая реализация. Эти системы будут отличаться от оптимальной, т. е. будут близкими к оптимальной или квазиоптимальной. При этом, отказавшись от построения «идеальной» оптимальной системы и поставив более скромную задачу – осуществить только квазиоптимальное регулирование, можно значительно упростить техническое выполнение системы.

Вопрос о количественной оценке близости квазиоптимальной системы соответствующей ей «идеальной» является нелегким, недостаточно разработанным теоретически. Практически такая оценка может быть проведена путем сравнения показателей выполненной реальной системы с показателями, полученными при расчете математической модели. Однако при этом неизбежно приходится сталкиваться с вопросом о том, какова количественная оценка близости математической модели и реальной системы. В общем случае система регулирования охлаждения дизеля состоит из программатора-задатчика (П) 1, вырабатывающего задающее воздействие (программу, программное движение); регулятора (Р) 2 и объекта управления (ОУ) 3 – рис. 2.

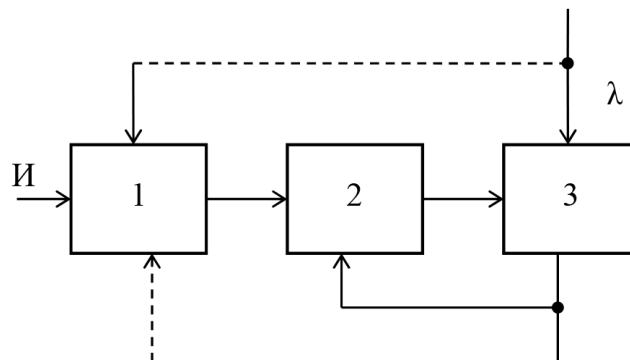


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования:
1 – программатор; 2 – терморегулятор; 3 – объект управления

На схеме символ *И* обозначает совокупность внешней информации, которая поступает на программатор. Задача синтеза оптимальной системы состоит в том, чтобы для заданного объекта синтезировать регулятор и программатор, которые, в определенном смысле, наилучшим образом решают поставленную задачу регулирования. Математически эти задачи могут быть сформулированы единообразно и решаться одними и теми же методами, но в то же время они имеют специфические особенности, которые делают целесообразным на определенном этапе их раздельное рассмотрение. Эти особенности обуславливаются тем, что решение первой задачи связано, как правило, с определением программного регулирования, а решение второй – с определением регулирования с обратной связью. Таким образом, программное регулирование – это управление в виде функции от времени, а регулирование с обратной связью – регулирование в виде функции от фазовых координат.

Системы с оптимальным программатором являются оптимальными по режиму регулирования, а системы с оптимальным терморегулятором (ТРГ) – оптимальными по переходному режиму. В случае использования программатора и ТРГ получим систему автоматического регулирования.

Так как программное движение в САРГ дизеля задается, требуется определить наилучший ТРГ, в результате чего получим оптимальную систему автоматического регулирования.

Систему автоматического регулирования температурного состояния дизеля можно структурно рассматривать как одноконтурную, приведенную на рис. 3 в виде условных изображений звеньев и связей между ними [11]. В общем виде система состоит из двух укрупненных структурных звеньев: объекта и регулятора. На рис. 3 линиями обозначены связи между звеньями и отмечено кружком местоположение регулирующего органа (РО). Объект с регулятором определяет главную обратную связь. Видно, что система автоматического регулирования температуры является замкнутой системой звеньев направленного действия.

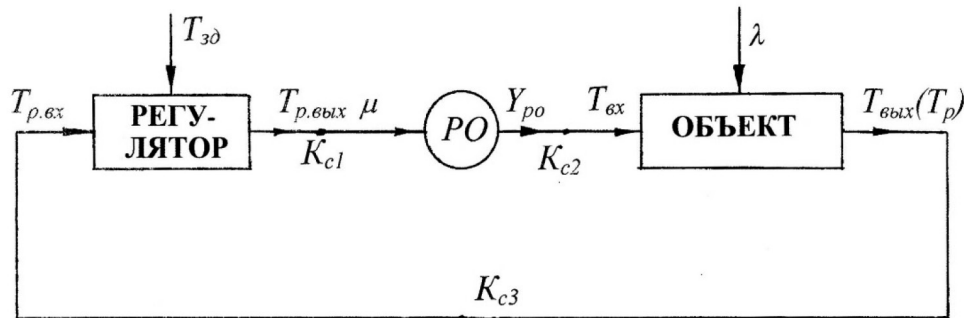


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования температурного состояния судового дизеля

Объект характеризуется координатами: температурой входа $T_{вх}$, температурой выхода $T_{вых}(T_p)$ и координатой нагрузки λ , которая служит второй входной координатой в дизеле. Регулятор характеризуется температурой входа $T_{р.вх}$, температурой выхода $T_{р.вых}$ и температурой задания $T_{зд}$. На линиях связи указывают передаточные коэффициенты связей K_{c1} , K_{c2} , K_{c3} .

С помощью специальных настроечных органов задания, которыми оборудуются терморегуляторы, можно установить то или иное значение температуры задания $T_{зд}$. В соответствии с этим параметром определяться и значение регулируемого параметра, которое будет поддерживаться ТРГ. При помощи возмущающего воздействия λ объект меняет заданный режим. Возмущающими воздействиями принято называть воздействия, стремящиеся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой температурой. При этом под задающим воздействием понимается воздействие на систему, определяющее необходимый закон изменения регулируемой температуры. Действие ТРГ на объект, в результате которого последний возвращается в равновесный режим при обеспечении необходимого значения параметра, назовем *регулирующим воздействием* μ . ТРГ осуществляет воздействие на дизель через РО, который преобразует изменение получаемой на выходе из ТРГ температуры воды, поступающей на вход в дизель. Требования к точности поддержания регулируемой температуры в статике и динамике допускают здесь применение простейших конструкций статических ТРГ и регулирование только по отклонению регулируемой температуры. ТРГ, а также дизель с его системой охлаждения являются составными частями системы регулирования температуры охлаждающей воды. Отклонение регулируемой температуры охлаждающей воды от заданного значения зависит, с одной стороны, от свойств, ТРГ а с другой – от свойств самого дизеля с его системой охлаждения.

Таким образом, операция регулирования температуры дизеля включает пять основных этапов:

- измерение регулируемой температуры;
- сравнение измеренной величины со значением, заданным уставкой;
- обработку этой разности (ошибки) в ТРГ;
- переработку управляющего сигнала в регулирующее воздействие;
- возвращение регулируемой температуры к заданному значению под влиянием регулирующего воздействия.

В существующих системах автоматического регулирования температурного состояния ДВС на всех режимах работы дизеля алгоритм функционирования содержит предписание о поддержании постоянного значения регулируемой температуры охлаждающей жидкости, которая является системой стабилизации. Используя в этой работе кроме системы стабилизации, электрические элементы в исполнительно регулирующем устройстве ТРГ, предполагается создать систему программного регулирования, которая содержит алгоритм функционирования САРТ, т. е. предписание об изменении регулируемой температуры в соответствии с заранее заданной функцией. Необходимое изменение регулируемой температуры по нагрузке дизеля обеспечивается в этой системе по строго определенной программе. На вход объекта поступает регулирующее (управляющее) воздействие μ от ТРГ. Если таких воздействий несколько: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$, то их можно объединить в вектор $\bar{\mu}$ с координатами $\mu_j (j = 1, \dots, r)$: $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_r)$.

На вход ТРГ подается задающее воздействие $T_{зд}$, представляющее собой инструкцию о том, какой должна быть выходная температура (регулируемая температура) $T_{вых}(T_p)$ охлаждающей жидкости. Эта инструкция должна конкретизировать цель регулирования. Инструкция может представлять собой коллекцию из n величин T_1^*, \dots, T_n^* , которые будем считать координатами вектора T^* : $\bar{T}^*(T_1^*, \dots, T_n^*)$. Например, можно принять, чтобы в идеальном случае удовлетворялись условия $T_i = T_i^* (i = 1, \dots, n)$, где T_i^* – заданные функции времени.

Отклонение величины выходной (регулируемой) температуры $T_{вых}(T_p)$ от установленных значений может произойти ввиду следующих причин:

- неправильное, неточное или запоздалое использование ТРГ содержащейся в нем или входящей к нему информации о характеристиках объекта и о цели регулирования, этот недостаток, в принципе, может быть исправлен усовершенствованием закона действия (алгоритма) ТРГ.

- ограничение ресурсов регулирования, т. е. невозможность по тем или иным причинам подавать на объект такие регулирующие воздействия $\bar{\mu}$, которые могут обеспечить требуемое поведение $\bar{\mu}$ объекта. (В условиях эксплуатации дизелей ресурсы управления всегда ограничены, и это обстоятельство необходимо учитывать).

- некоторое заранее непредвиденное и не контролируемое возмущающее воздействие λ , влияющее на его выходную величину, например, резкое изменение температуры охлаждающей забортной воды, поступающей на объект. (Если на различные части объекта действуют возмущения $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, будем представлять их в виде вектора $\bar{\lambda}$: $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$).

Кроме того, возмущающее воздействие $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ или помехи, воздействующие на управляемый объект, могут вызывать заранее непредвиденное изменение его характеристик. Влияние изменения нагрузки на объект можно рассматривать как частный случай действия помехи.

Предположим, что алгоритм ТРГ обеспечивает успешную работу системы при определенных характеристиках объекта. Однако при изменении возмущающих воздействий работа системы может ухудшиться, и величина $T_{вых}(T_p)$ станет значительно отклоняться от номинального значения.

Принцип обратной связи во многих случаях создает возможность удовлетворения требованиям, предъявляемым к величине \bar{T}_p , даже при наличии значительной помехи $\bar{\lambda}$, действующей на объект. Однако характеристики объектов в судовых дизелях сложны и быстро изменяются в широком диапазоне, поэтому задача регулирования затрудняется. В таких случаях получение информации о помехе $\bar{\lambda}$ или хотя бы о некоторых составляющих $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ может оказать существенную помощь, улучшив результат регулирования. Пусть помеха измеряется и результат измерения поступает (см. пунктирную линию на рис. 2) в регулирующее устройство, которое может рассчитать и подать такое регулирующее воздействие $\bar{\mu}$, которое скомпенсирует, нейтрализует влияние помехи $\bar{\lambda}$ и приведет выходную температуру \bar{T}_p объекта в лучшее соответствие с требованиями. Этот прием назовем *компенсацией*. Цепь компенсации не является линией обратной связи, так как по ней передается значение входной, а не выходной величины объекта, т. е. система становится комбинированной.

Следует отметить, что область применения принципа компенсации гораздо уже области применения принципа обратной связи. Это объясняется главным образом тем, что на объект дей-

ствует большое количество различных помех $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Значительная часть этих помех вообще не поддается измерению и поэтому не может быть скомпенсирована с помощью цепи, обозначенной пунктирной линией на рис. 2. Даже если бы и существовала принципиальная возможность измерения множества помех λ_p , то расчет нейтрализующего их воздействия $\bar{\mu}$ был бы чрезмерно сложным. Поэтому регулирующее устройство оказалось бы слишком громоздким, а результаты работы системы могли бы все-таки быть недостаточно успешными, так как не все помехи можно измерить. Между тем принцип обратной связи позволяет измерять только лишь отклонение регулируемой температуры \bar{T}_p от требований и формировать регулирующее воздействие $\bar{\mu}$, которое приближает T_p к требуемому значению. Очевидно, что принцип обратной связи гораздо более универсален и, вообще говоря, приводит к более простым методам регулирования, чем принцип компенсации. Однако в случае использования электронных элементов в дизеле измерение возмущающего воздействия при помощи электрических средств осуществляется легко, поэтому метод компенсации или его сочетание с принципом обратной связи оказывается наиболее удачным.

В САРТ дизеля объект задан и его свойства изменять нельзя. Между тем алгоритм регулирующего устройства большей частью вовсе не задан, и его можно выбирать из широкого класса возможных алгоритмов. Задача построения системы сводится, таким образом, к задаче разработки такого регулирующего устройства, которое, в известном смысле, наилучшим образом управляет объектом.

В судовых дизелях к ТРГ обычно предъявляется ряд самостоятельных требований, не имеющих прямого отношения к объекту. Допустим, что, если это потребуется, то ТРГ может быть любым – например, сколько угодно сложным, а также безынерционным. Такое отсутствие ограничений обусловлено обширными возможностями современной вычислительной техники. Кроме того, наложение дополнительных ограничений на регулирующее устройство может резко усложнить задачу нахождения оптимальной системы. Такое усложнение возникает при наличии требования о том, чтобы сложность или надежность либо стоимость регулирующего устройства μ не превышали допустимый уровень.

В число характеристик объекта входят ограничения различного вида. Например, регулирующие воздействия $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$, входящие в состав вектора $\bar{\mu}$ (см. рис. 3), не могут иметь любые значения. В частности, они не могут, вследствие физических свойств объекта, или не должны (например, из-за нарушения нормальной работы объекта) превышать некоторые пределы, например, $|\mu_1| \leq U_1, \dots, |\mu_r| \leq U_r$, где U_1, \dots, U_r – заданные константы.

В состав требований, предъявляемых к поведению объекта, входит задание определенной цели регулирования. В любом случае цель регулирования можно рассматривать как достижение некоторой величины G – критерия оптимальности. В зависимости от требований необходим либо максимум, либо минимум величины G . В общем случае критерий оптимальности зависит как от задающего воздействия $\bar{T}_{зад}$, так и от выходной величины \bar{T}_p . Он может зависеть также от μ и $\bar{\lambda}$ или от времени t . Пусть для определенности требуется, чтобы величина G была минимальна:

$$G(T_p, \bar{T}_{зад}, \bar{\lambda}, t) = \min. \quad (1)$$

Это условие представляет собой аналитическую формулировку цели регулирования. Отметим, что G является функциональным числом, т. е. зависящим от вида функций регулируемой температуры T_p , регулирующих воздействий μ и помех λ от времени t . Например, в частном случае G имеет вид

$$G = M \int_0^N [T_p(t) - T_{зад}(t)] dt, \quad (2)$$

где N – фиксированная величина.

Из формулы (1) видно, что величина G зависит от вида функций $T_p(t)$ и $T_{зад}(t)$ на интервале $0 < t < N$. Из этой формулы для G можно определить не только возможное минимальное значение G_{min} , но и оценить ухудшение работы системы при отклонении ее от номинального значения.

Мерой ухудшения может явиться разность $G - G_{\min}$ или какая-либо монотонная функция этой разности, обращающаяся в нуль при $G = G_{\min}$.

Возможны различные линии классификации по типам критериев G . Так, можно делить критерии оптимальности в зависимости от того, относятся они к переходному или установившемуся процессу в системе. Часто критерием оптимальности в переходном процессе удобно считать время регулирования или величину максимального отклонения температуры процесса от некоторой заданной величины или функции времени. В этом случае требуется, чтобы в оптимальной системе был достигнут минимум максимального отклонения, так называемый минимакс.

Важно отметить, что нельзя ставить задачу исследования одновременного достижения экстремума для двух или нескольких переменных. Действительно, экстремумы у различных функций или функционалов не соответствуют одному и тому же значению совокупности аргументов. Поэтому значений аргументов, соответствующих экстремуму одновременно двух и более функций и функционалов, в общем случае не существует. Можно ставить лишь задачу достижения экстремума одной функции или функционала, но при этом накладывать дополнительные условия в любом количестве об ограничении других функций или функционалов. Сами эти ограничения могут носить сложный характер. Например, можно потребовать такого подбора вектора \bar{T} , чтобы функция $G_1(\bar{T})$ достигла максимума, но при этом значения других функций $G_2(\bar{T})$ и $G_3(\bar{T})$ не отклонялись в процентном отношении от своих экстремумов более чем на ε_2 и ε_3 соответственно. Вопрос о существовании значения T , удовлетворяющего этим условиям, может быть решен лишь при рассмотрении конкретной системы.

В настоящее время известно несколько методов синтеза оптимальных по быстродействию систем управления объектами с запаздыванием. Наиболее широко применяют метод, основанный на компенсации временного запаздывания в оптимальных системах по методу Р. Бэсса, изложенный в публикации [12]. Сущность его состоит в том, что для компенсации запаздывания в оптимальных системах при построении функции аргумента управления вводится поправка на период времени τ с тем, чтобы регулирующие воздействия системы с запаздыванием и той же системы без запаздывания совпадали. В математической интерпретации это означает, что в фазовом пространстве поверхность регулирования, упреждающая по времени на τ поверхность переключения, строится по заданной поверхности переключения той же системы без запаздывания.

К основному недостатку метода компенсации запаздывания следует отнести то, что получаемая оптимальная поверхность переключения в компенсированных системах вблизи начала координат фазового пространства оказывается неоднозначной. При определенных начальных условиях движение в системе становится неоптимальным: увеличивается число интервалов переключения, возрастает время переходного процесса. При этом отклонение фазовой траектории от оптимальной может быть существенным и различным, но оценить его заранее сложно. Избавиться от этого недостатка можно лишь с помощью использования при синтезе специальных подходов. При построении оптимального управляющего устройства, в основу которого положен метод компенсации временного запаздывания, для образования упрежденных на время τ фазовых координат применяется модель объекта регулирования. Воспроизводя оптимальную линию переключения аналогичной системы без запаздывания, удастся получить оптимальные по быстродействию переходные процессы в нейтральной системе с транспортным запаздыванием.

Качество регулирования теплового состояния дизеля может быть повышено путем увеличения входных сигналов. Функциональные схемы автоматического регулирования теплового состояния в традиционной двухконтурной системе охлаждения приведены на рис. 4. Наиболее типичной является одномерная схема регулирования (см. рис. 4 а), в которой объектом регулирования является температура охлаждающей жидкости. Однако более предпочтительны многомерные системы регулирования (см. рис. 4 б), в которых выходными параметрами являются значения температуры высоконагретой детали $T_{\text{дет}}$, охлаждающей жидкости $T_{\text{ж}}$ и моторного масла $T_{\text{м}}$. Число регулирующих воздействий μ , в таких системах должно быть не менее количества регулируемых

системой температур. Поддержание оптимального теплового состояния двигателя может быть обеспечено, если регулирование температуры охлаждающей жидкости $T_{ж}$ дополнить регулированием температуры высоконагретой детали $T_{дет}$. В этом случае должно осуществляться два регулирующих воздействия, одним из которых может быть управляемое давление в системе охлаждения. Управление давлением в системе охлаждения в зависимости от режима работы двигателя предлагается осуществлять при помощи устройства, описанного в работах [13], [14]. Регулирование давления во внутреннем контуре системы жидкостного охлаждения приобретает особое значение при переходе на высокотемпературное охлаждение, которое обладает определенными важными достоинствами и получает все более широкое распространение в СЭУ.

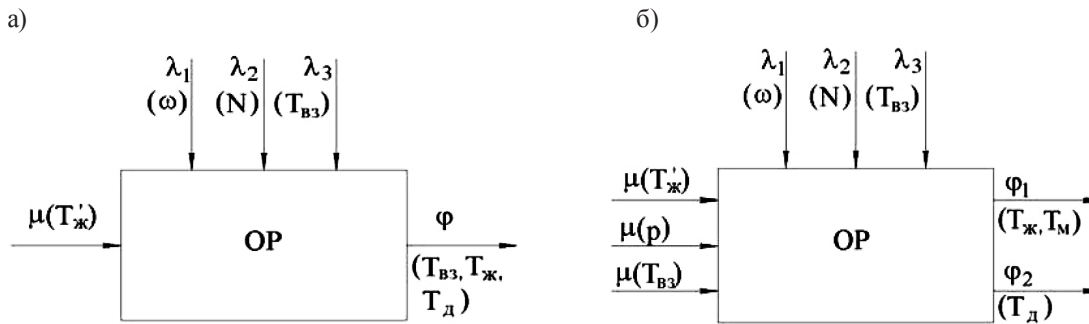


Рис. 4. Схема ДВС как объекта регулирования теплового состояния:
 а – одномерная; б – многомерная

Температурное и теплонапряженное состояние современных судовых дизелей, оснащенных системами газотурбинного наддува, зависит не только от температуры охлаждающей жидкости, но и от температуры воздушного заряда, поступающего в цилиндры двигателя. В связи с этим оптимальное тепловое состояние дизеля и достижение наилучших экономических, экологических и ресурсных показателей работы двигателя на различных эксплуатационных режимах возможно лишь при условии связанного регулирования температур охлаждающей жидкости и наддувочного воздуха. Для осуществления такого регулирования необходимо определить оптимальное сочетание давления наддувочного воздуха и его температуры для различных режимов работы двигателя, запрограммировать управление данными параметрами и модернизировать систему газотурбинного наддува, установив в ней автоматические регуляторы параметров наддува. Поставленные задачи решались в работах [15], [16].

Водно-химические режимы охлаждения задаются путем введения в охлаждающую воду внутреннего контура систем охлаждения судовых дизелей, комплексных многофункциональных присадок химического типа, содержащих поверхностно-активные вещества и водорастворимые полимеры, которые способны не только обеспечивать эффективную защиту элементов систем охлаждения от кавитационно-коррозионных разрушений и накипеобразования, но и оказывать направленное влияние на процессы теплообмена в полостях охлаждения [17]. В процессе эксплуатации происходит старение охлаждающей жидкости в результате деструкции введенных присадок под действием тепловых и физических воздействий.

С физической точки зрения следствием термомеханического воздействия, возникающего при прокачивании жидкости по системе охлаждения, является растяжение межмолекулярных связей в молекулах веществ, входящих в раствор, межмолекулярных связей в макромолекулах полимеров и связей, удерживающих ПАВ в мицеллярных образованиях. Конечным результатом такого растяжения является разрыв связей. Очевидно, что, в первую очередь, будут разрушаться наиболее слабые связи. Механизм старения охлаждающих жидкостей и закономерности изменения основных физико-химических свойств жидкости в зависимости от условий эксплуатации и режимных параметров охлаждения исследованы в работе [18]. Контроль и восстановление требуемых эксплуатационных свойств охлаждающей жидкости в автоматическом режиме возможны при усло-

вии использования модернизированных САР охлаждения дизелей, включающих устройства для анализа физико-химических свойств охлаждающей жидкости и коррекции ее состава [19], [20].

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие принципы современной концепции регулирования охлаждения судовых дизелей.

1. Регулируемыми параметрами жидкостных систем охлаждения должны служить температура охлаждающей жидкости, давление в контуре охлаждения и физико-химические свойства охлаждающей жидкости.

2. Входными сигналами САР должны являться данные о режиме работы двигателя, его тепловом состоянии и свойствах охлаждающей жидкости.

3. Обеспечение оптимального теплового состояния дизеля на различных эксплуатационных режимах возможно лишь при условии связанного управления параметрами систем охлаждения и наддува общим блоком управления.

4. В качестве блоков управления САР охлаждения и наддува следует использовать программируемые устройства на основе микропроцессорной техники.

5. В качестве исполнительных механизмов САР с целью обеспечения требуемого быстродействия необходимо использовать устройства с электромагнитным управлением.

Реализация предлагаемой концепции позволит максимально полно использовать ресурсы совершенствования охлаждения судовых дизелей для повышения экономических, экологических и ресурсных показателей их работы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку управляющих программ, обеспечивающих оптимальное тепловое состояние судового дизеля с учетом особенностей его конструкции, условий эксплуатации и режимов работы.

Список литературы

1. *Кавтарадзе Р. З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях: монография / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 592 с.
2. *Woschni G.* Untersuchung des Wärmetransportes zwischen Kolben, Kolbenringen und Zylinderbüchse / G. Woschni, K. Benedikt, K. Zeilinger // MTZ: Motortech. — 1998. — Vol. 9. — P. 556–563.
3. *Кузьмин Н. А.* Критические значения температур деталей ЦПГ двигателей / Н. А. Кузьмин, О. П. Голубев // Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. «Проектирование, испытания, эксплуатация транспортных машин и транспортно-технологических комплексов» / НГТУ. — Н. Новгород, 2005. — С. 258–260.
4. *Жуков В. А.* Влияние параметров охлаждения на надежность комбинированных двигателей: монография / В. А. Жуков. — Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2012. — 172 с.
5. *Малиновский М. А.* Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы / М. А. Малиновский, А. А. Фока, В. И. Ролинский [и др.]. — Одесса: Феникс, 2007. — 149 с.
6. *Конкс Г. А.* Современные подходы к конструированию поршневых двигателей / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Изд-во «МОРКНИГА», 2009. — 388 с.
7. *Безюков О. К.* Совершенствование регулирования теплового состояния судовых ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Тр. II-го Междунар. науч.-техн. семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: СПб.ГУВК, 2008. — С. 58–63.
8. *Безюков О. К.* Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 51–60.
9. *Безюков О. К.* Охлаждающие жидкости транспортных ДВС: монография / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та водных коммуникаций, 2009. — 262 с.
10. *Жуков В. А.* Зависимость эксплуатационных показателей транспортных ДВС от свойств охлаждающих жидкостей / В. А. Жуков // Вестник машиностроения. — 2010. — № 12. — С. 58–62.
11. *Тимофеев В. Н.* Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование / В. Н. Тимофеев. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. — 358 с.

12. Хахулин Г. Ф. Основы моделирования АСУ / Г. Ф. Хахулин, Е. А. Сокуренок. — М.: Изд-во МАИ, 1990. — 60 с.

13. Безюков О. К. Совершенствование конструкции систем охлаждения судовых двигателей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Киров, 2007. — С. 67–70.

14. Пат. 2459093 РФ МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков; Опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23. — 7 с.

15. Жуков В. А. Выбор параметров газотурбинного наддува конверсионного двигателя / В. А. Жуков, М. С. Курин; под общ. ред. О. К. Безюкова // Тр. Междунар. науч.-техн. семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во «ПаркКом», 2006. — С. 66–71.

16. Жуков В. А. Модернизация системы газотурбинного наддува конвертированного дизеля / В. А. Жуков, М. С. Курин // Вестник машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 17–19.

17. Безюков О. К. Теплоносители систем охлаждения транспортных ДВС и способы обеспечения их эксплуатационных свойств / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Инженерный журнал. — 2009. — № 9. — С. 51–54.

18. Безюков О. К. Математическая модель старения охлаждающих жидкостей судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 76–83.

19. Жуков В. А. Контроль качества теплоносителей жидкостных систем охлаждения / В. А. Жуков // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 9. — С. 66–72.

20. Пат. 2453714 РФ МПК F01P 5/10 Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / В. А. Жуков; Опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17. — 7 с.

УДК 629.5.03: 632.151

А. А. Иванченко,
д-р техн. наук, проф.;

А. П. Петров,
канд. техн. наук, доц.;

Г. Е. Живлюк,
канд. техн. наук

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВ И РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AND REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Проанализировано нормирование выбросов вредных веществ энергетическими установками речных и морских судов, включая парниковые газы (выбросы диоксида углерода), с целью предотвращения загрязнения окружающей среды, являющееся одной из главных задач международных и национальных организаций. Сейчас уже широко известно, что в поисках критерия оценки совершенства судна пришли к оценке энергетической эффективности строящихся судов по конструктивному коэффициенту CO_2 , который определяется в выбросах диоксида углерода на тонно-милю перемещения грузов. Рассмотрены вопросы формирования понятия «конструктивный коэффициент энергетической эффективности судна – ККЭЭ». Методы его аналитической оценки и расчета для различных типов судов существенно отличаются. С учетом этого обстоятельства рассмотрены особенности оценки уровня выбросов парниковых газов с судов. В значительной степени это касается накатных судов и газозовов. Отмечено влияние отдельных конструктивных факторов на величину ККЭЭ.