

# Адаптивный турбонаддув дизель-генератора



**П. М. Радченко,**  
канд. техн. наук,  
профессор кафедры  
электрооборудования  
и автоматики судов  
Морского государственного  
университета (МГУ)  
им. адм. Г. И. Невельского.



**А. Г. Резник,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
судовых котельных и  
турбинных установок  
и вспомогательного  
оборудования МГУ  
им. адм. Г. И. Невельского.



**А. П. Данилович,**  
аспирант МГУ  
им. адм. Г. И. Невельского

Высокие требования на современных автоматизированных судах к бесперебойному электроснабжению, к качеству электроэнергии, равно как и к эксплуатационным характеристикам ее источников – дизель-генераторов, обуславливают необходимость качественного управления рабочими процессами вспомогательных дизелей в разных условиях: при случайных колебаниях нагрузки, при изменениях параметров окружающего воздуха и забортной воды, при смене сортов топлива и смазочного масла, а также технического состояния двигателей, их турбокомпрессоров наддува и пр. В указанных условиях остается не до конца решенной проблема воздушного снабжения двигателей, приводящих во вращение синхронные генераторы, на переходных режимах работы.

Высокая эффективность современных вспомогательных дизель-генераторов характеризуется низким удельным расходом топлива (174–177 г/кВт·ч) и средним (2,5–2,6 МПа) эффективным давлением в номинальном режиме работы. Топливная экономичность обеспечивается свободным газотурбинным наддувом со степенью повышения давления компрессоров до 5,8–6,0. Окружная скорость рабочих колес компрессоров достигает значений около 500 м/с.

Наряду с улучшением удельных мощностных, массогабаритных и экономических характеристик генераторных агрегатов в установившихся режимах работы (рис. 1) в переходных режимах применение свободного наддува приводит к нарушению рабочего процесса дизеля. Это связано с инерционностью ротора турбокомпрессора (ТК) и с наличием дополнительной емкости – ресивера наддувочного воздуха, что также влияет на характеристику двигателя как

объекта регулирования.

У двигателей с газотурбинным наддувом ухудшается важная эксплуатационная характеристика дизелей в динамических режимах – приемистость нагрузки. Физически это выражается в увеличении провалов и всплесков угловой скорости дизель-генераторов (ДГ) в периоды резких изменений их активной нагрузки, а также в увеличении времени восстановления угловой скорости. При прочих равных условиях это приводит к ухудшению качества вырабатываемой электроэнергии при том, что в постоянно расширяющемся перечне судовых электроприемников появилась группа (вычислительная техника, автоматика, электронavigационные приборы, цифровая радиоаппаратура, информационно-измерительные и регистрирующие комплексы и др.), которую отличают, напротив, более жесткие требования к качеству электроэнергии.

Объясняется ухудшение приемистости двигателей тем, что роторы турбокомпрессоров со свободным наддувом (ТКСН) при высоких значениях окружной скорости обладают значительной инерционностью и в период резкого наброса/сброса нагрузки изменения частот вращения коленчатого вала дизеля и ротора ТК смещаются по фазе. Таким образом, при резких колебаниях нагрузки двигателя изменения давления наддувочного воздуха отстают по фазе от соответствующих изменений подачи топлива.

Вследствие этого в переходных режимах возникает больше несгоревших паров углеводородного топлива, со-

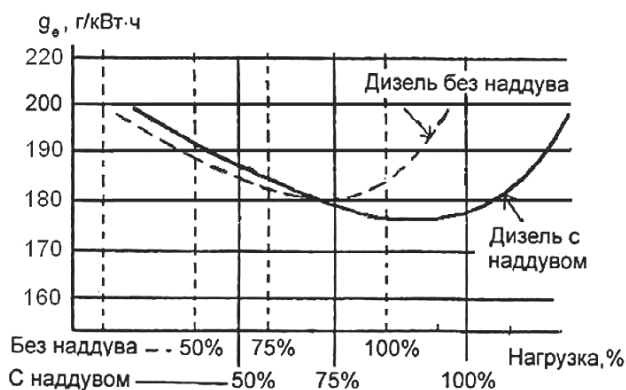


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива дизелей от нагрузки

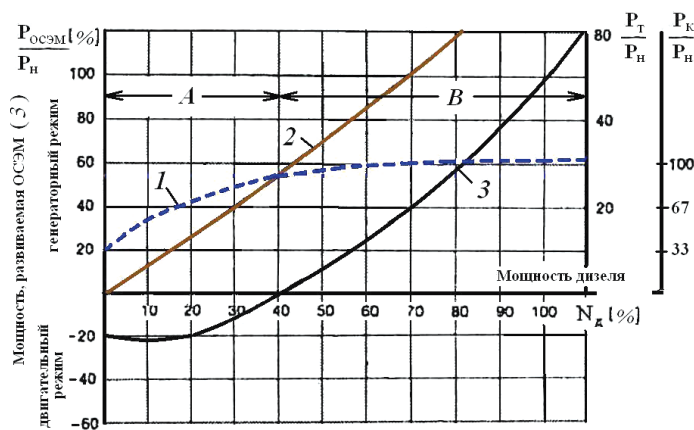


Рис. 2. Кривые зависимости мощности элементов турбокомпрессора наддува со смешанным приводом от нагрузки дизель-генератора:

- 1 – мощность  $P_k$ , потребляемая компрессором для обеспечения оптимального  $\alpha_{изб}$ .
- 2 – мощность  $P_r$ , развиваемая газовой турбиной.
- 3 – мощность  $P_{осэм}$ , развиваемая ОСЭМ

ответственно, в отработавших газах – твердых частиц (сажи) и вредных недоокислившимся продуктах сгорания:  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $H_xC_x$ , альдегидов и пр. Происходит дымный выхлоп, вместе с недоокислившимися газами и сажей в атмосферу выбрасывается и не высвободившаяся полностью химическая энергия паров топлива. Твердые пожароопасные частицы сажи осаждаются на стенках камеры сгорания, коллектора, газовой турбины ТКСН и выхлопном тракте дизеля. Образуются потенциальные очаги возгорания, а накапливающийся слой сажи ухудшает теплообмен в блоке цилиндров дизеля. По этой причине приходится чаще проводить моточистки ДГ, ТКСН и глушителя, т. е. повышается трудоемкость их обслуживания на фоне сокращения численности экипажа судна.

При запуске дизеля из режима «горячий резерв» недостаточные значения коэффициента избытка воздуха становятся одной из наиболее вероятных причин его незапуска с первой попытки, когда происходит впрыск первых порций топлива, а ТКСН еще не набрал нужных оборотов. Понятно, что незапуск с первой попытки задерживает ввод ДГ в работу, а в случае обесточивания электросети (black out) – восстановление электроснабжения судна.

Неполное сгорание паров топлива у ДГ со свободным турбонаддувом наблюдается также в статических доле-вых режимах его работы при нагрузках менее 30–40 % номинальной. Более того, в указанном диапазоне нагрузок происходит даже некоторое увеличение удельного расхода топлива по сравнению с агрегатом без турбонад-

дува (рис. 1). Параметры отработавших газов: количество, давление, температура, а значит, и располагаемая мощность газовой турбины ТКСН (рис. 2, зависимость 2) не обеспечивают в этих режимах надлежащей производительности ТК (кривая 1). Следовательно, не удается получить требуемые (оптимальные) значения коэффициента избытка воздуха в цилиндрах двигателя (рис. 3). Вследствие недостатка кислорода топливо сгорает не полностью, поэтому его удельный расход возрастает. Экономичность ДГ снижается, его экологические и эксплуатационные характеристики ухудшаются. Длительная работа ДГ с нагрузкой менее 30 % номинальной становится недопустимой.

Поиск возможностей для быстрого и надежного запуска резервных дизель-генераторов, для улучшения их динамических характеристик, экономических и экологических показателей работы в переходных и статических режимах неполных нагрузок вплоть до холостого хода, а также для снижения их пожароопасности и трудоемкости обслуживания, равно как и для полезного использования вторичных ресурсов в режимах полных нагрузок приводит к разным решениям. Это привод ТК от коленчатого вала двигателя с помощью обгонных муфт, впуск воды в выпускной коллектор для дополнительного увеличения массы рабочего тела турбины, регулирование соплового аппарата турбины, привод ротора ТК от специального электродвигателя, соосного с ротором, для исключения работы вспомогательной воздухоудовки на пусковых и частичных режимах работы двухтактных дизелей

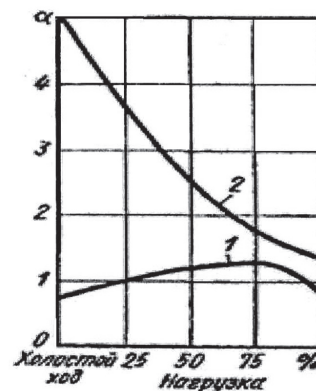


Рис. 3. Пределы изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в зависимости от нагрузки:

- 1 – карбюраторный двигатель;
- 2 – дизель

[1, 2]. Практически все эти решения относятся к главным двигателям.

Далее рассматривается одна из технологий воздухообеспечения вспомогательных дизелей, с помощью которой можно в комплексе решить приведенные задачи. Она основана на использовании смешанного (комбинированного) привода турбокомпрессора наддува: от утилизирующей газовой турбины и дополнительной (бустерной) электрической машины (рис. 4), расположенных соосно [3, 4].

Данная технология рассматривается применительно к вспомогательному ДГ 18, двигатель которого снабжен механически управляемыми форсунками (не показаны), каждая из которых оборудована топливным насосом высокого давления (ТНВД) (не показаны), и общей топливной рейкой 12. Воздух в камеры сгорания дизеля подается за счет турбокомпрессора наддува (ТКН) 5 со смешанным приводом от газовой турбины 4, приводимой в движение отработавшими газами двигателя, и обратимой электрической машины (ОЭМ) 8, соединенных кинематически валами непосредственно (если используется быстроходная ОЭМ) или посредством согласующей зубчатой передачи (при серийной ОЭМ). Якорная обмотка ОЭМ для электропитания подключается к шинам главного распределительного щита (ГРЩ) судовой электростанции через обратимый статический полупроводниковый преобразователь (СПП) 9, снабженный электронной системой управления 10.

Система автоматического регулирования сгорания топлива состоит из двух

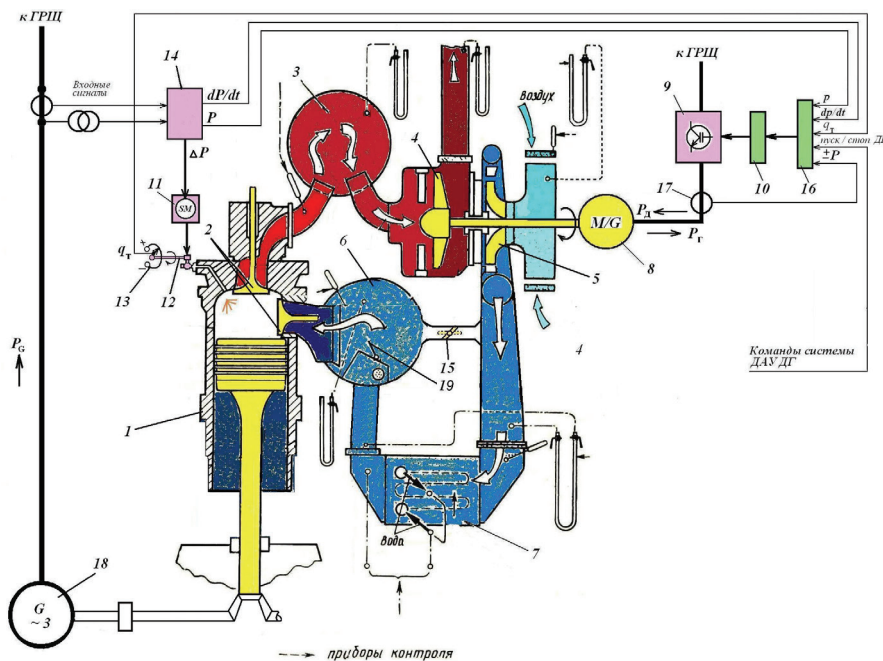


Рис. 4. Турбокомпрессор наддува с комбинированным приводом для вспомогательного дизель-генератора: 1 – цилиндры; 2 – впускной и выпускной клапаны; 3 – коллектор отработавших газов; 4 – утилизирующая газовая турбина; 5 – турбокомпрессор наддува; 6 – ресивер; 7 – воздухоохладитель; 8 – обратимая электрическая машина (ОЭМ); 9 – статический полупроводниковый преобразователь (СПП); 10 – система управления СПП; 11 – механический регулятор угловой скорости; 12 – топливная рейка ТНВД; 13 – потенциометр; 14 – трехимпульсный электрический ПИД-регулятор подачи топлива и наддувочного воздуха; 15 – байпасный воздушный клапан; 16 – блок адаптивного управления давлением наддувочного воздуха; 17 – датчик направления мощности ОЭМ; 18 – синхронный дизель-генератор; 19 – воздушная заслонка; SM – сервомотор

взаимосвязанных подсистем: регулирования подачи топлива и регулирования расхода и давления наддувочного воздуха. Подсистема регулирования подачи топлива содержит механический регулятор угловой скорости 11, выходной орган которого перемещает топливную рейку ТНВД 12 и кинематически связаный с ней потенциометр 13. В корпус регулятора подачи топлива встроены электрический сервомотор SM. Данный регулятор угловой скорости 11 обеспечивает работу ДГ с постоянной частотой вращения во всем эксплуатационном диапазоне его нагрузок: от холостого хода до номинальной.

Подсистема регулирования расхода и давления наддувочного воздуха включает ТКН 5 с нерегулируемым (пассивным) приводом от утилизирующей газовой турбины 4 и регулируемым (активным) приводом от ОЭМ 8, снабженной СПП 9, системой управления 10 и электронным блоком адаптивного управления 16. Согласованное управление обеими подсистемами регулирования осуществляется выходными сигналами трехимпульсного (комбинированного) электронного пропорцио-

нально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора 14 по типу [5], который подключен электрически к выходным клеммам синхронного генератора и контролирует изменения его нагрузки. С выхода  $dP/dt$  этого регулятора снимают сигнал динамического приращения мощности (ее первой производной) в режимах наброса/сброса нагрузки, с выхода  $\Delta P$  – сигнал статического приращения этой мощности, а с выхода  $P$  – сигнал, пропорциональный текущей статической нагрузке ДГ. Этими выходными сигналами электронный ПИД-регулятор 14 воздействует на входы указанных подсистем регулирования. Отметим, что на подсистему регулирования подачи топлива (ее серводвигатель SM) воздействуют только сигналами « $\Delta P$ » статического приращения мощности, тогда как на вход другой подсистемы (ее блок адаптивного управления 16) – всеми тремя выходными сигналами: первым « $dP/dt$ » и третьим « $P$ » – напрямую, а вторым сигналом « $\Delta P$ » – через механический регулятор подачи топлива 11 и потенциометр 13 после его преобразования в сигнал, пропорциональный подаче топлива « $q_t$ ». За счет этого при

набросе/сбросе нагрузки на ДГ на его подсистему регулирования расхода и давления воздуха ввиду большей инерционности ее ТКН воздействуют с некоторым опережением по отношению к подсистеме подачи топлива.

Благодаря этому, а также вследствие безынерционности СПП 9, электронного блока адаптивного управления 16 и системы управления 10 обеспечивается требуемое быстродействие подсистемы регулирования расхода и давления наддувочного воздуха дизеля, адекватное скорости изменения подачи топлива.

Управление процессом сгорания топлива в цилиндрах дизеля, снабженного указанной системой регулирования, в разных режимах выполняется следующим образом.

### Пуск резервного дизель-генератора

При нарушении нормального электроснабжения судна продолжительность обесточивания его электросистемы определяется прежде всего временем запуска первичного двигателя резервного (дежурного) генератора. Естественно, наименьшая продолжительность запуска достигается в том случае, если он удастся с первой попытки. При прочих равных условиях – одинаковых степенях готовности двигателя, топлива и воздуха – гарантированный пуск с первой попытки зависит от правильно подобранного соотношения горючей смеси топливо – воздух, определяемого коэффициентом  $\alpha$  избытка воздуха в камерах сгорания двигателя к моменту впрыска первой порции топлива.

Полное время запуска  $t_{\text{пус}}$  двигателя до частоты вращения холостого хода с первой попытки складывается из нескольких последовательных этапов:

$$t_{\text{пус}} = t_{\text{р.ст}} + t_{\text{уст}} + t_{\text{р.топ}}$$

где  $t_{\text{р.ст}}$  – время разгона двигателя пусковой системой (например, стартерной) до  $\omega_{\text{min}}$  – угловой скорости, при которой двигатель может работать устойчиво на топливе;

$t_{\text{уст}}$  – промежуток времени от установления угловой скорости  $\omega_{\text{min}}$  до появления устойчивых, без пропусков вспышек впрыскиваемых порций топлива;

$t_{\text{р.топ}}$  – продолжительность разгона двигателя на топливе до угловой скорости холостого хода.

Оптимизируя каждый из указанных временных промежутков, можно свести время запуска ДГ до значения  $t_{\text{пус.опт}}$  – теоретически и практически наименьшего значения для данного спо-

соба запуска: воздушно-цилиндрового, стартерного, маховичного или иного. Рассмотрим способы и пределы оптимизации каждого из этих промежутков при стартерном (электрическом или пневматическом) способе запуска.

Интенсивность (ускорение) и время разгона двигателя стартером определяются значением избыточного вращающего момента  $M_{ст}$ , развиваемого стартером, по отношению к моменту сопротивления на его валу:  $M_{ст} - M_c = M_d$ ,  $M_d = J \frac{d\omega}{dt}$ ,  $t_{рст} = \frac{J \cdot \omega_{min}}{M_{ст} - M_c}$ ,

где  $M_{ст}$  – вращающий момент, развиваемый стартером и определяемый его установленной (габаритной) мощностью;

$M_c$  – момент сопротивления, создаваемый движущимися частями разгоняемого двигателя;

$M_d$  – динамический момент, преодолеваемый стартером в период разгона и обусловленный накоплением движущимися частями агрегата кинетической энергии;

$J$  – момент инерции вращающихся масс ДГ;

$\omega$ ,  $\omega_{min}$  – текущая угловая скорость и ее минимальное значение, соответственно;

$d\omega/dt$  – ускорение вращательного движения.

Момент сопротивления движущихся частей двигателя при запуске создается силами инерции покоя и трения. Последняя зависит от температуры и давления масла в системе к моменту запуска, т. е. от подготовленности агрегата. Микрокомпьютерная система дистанционного автоматизированного управления ДГ может задавать и поддерживать эти параметры оптимально в соответствии с температурными условиями окружающей среды и сорта смазочного масла.

Условия для воспламенения первой порции впрыскиваемого топлива, а следовательно, и продолжительность  $t_{уст}$  зависят от ряда факторов: коэффициента  $\alpha$  избытка воздуха, степени сжатия и температуры воздуха, пусковой подачи топлива (30–50 % при первом, «мягком» пуске и 100 % при повторном, «жестком»), качества смесеобразования, температуры стенок цилиндров. Первые два фактора при прочих равных условиях зависят от расхода и давления наддувочного воздуха, которое в ДГ со свободным наддувом в период пуска при неработающем ТК близко к атмосферному давлению и регулированию не поддается. А в ТК со смешанным приводом коэффициент  $\alpha$  может быть повышен до требуемого по условиям пуска значения ( $\alpha_{пус.опт}$ ) за счет разгона

и вращения ТК от ОЭМ 8, вводимой в работу в режиме электродвигателя одновременно с разгоном дизеля его пусковой системой.

В холодное время года температура наддувочного воздуха в пусковой период может быть повышена (по сигналу датчика температуры наружного воздуха) за счет подогрева воздуха в калорифере и выключения на время пусковой операции охладителя наддувочного воздуха 7 посредством байпасного клапана 15. Температура стенок цилиндров также может быть повышена (с учетом текущей температуры окружающей среды) за счет подбора более высоких значений заданной температуры прокачиваемых воды и масла в период «горячего резервирования». Причем для большей экономичности режима «горячего резервирования» дежурного ДГ целесообразно подогревать стенки его цилиндров и смазочное масло с помощью вторичных ресурсов рабочего ДГ, а давление масла поддерживать не автономным электрическим насосом, включаемым периодически, а навешенным насосом рабочего ДГ, работающим непрерывно [3].

После гарантированного перехода двигателя на топливо и выключения стартера время его разгона до угловой скорости холостого хода  $\omega_{х.х}$ , устанавливаемой в процессе настройки механического регулятора подачи топлива 11, зависит от степени форсировки последней, следующей сразу за устойчивыми вспышками первых порций топлива. В двигателе со свободным наддувом форсировка подачи топлива не может быть высокой, так как ТКСН запаздывает с повышением давления наддува и топливо не успевает сгорать.

При введении в состав ТКН 4, 5 бустерной ОЭМ 8 этот недостаток устраняется и степень форсировки цикловой подачи топлива может быть повышена. Разгон ДГ от  $\omega_{min}$  до  $\omega_{х.х}$  сокращается до десятых долей секунды. Механический регулятор подачи топлива 11 должен быть настроен так, чтобы в первые два-три цикла после воспламенения горючей смеси обеспечивался впрыск усиленных порций топлива, в следующие циклы объем цикловой подачи уменьшался с замедлением, обратно пропорциональным скорости нарастания частоты вращения двигателя, и при достижении заданного значения угловой скорости  $\omega_{х.х}$  дизель-генератора подача топлива соответствовала бы его устано-

вившемуся режиму холостого хода при коэффициенте  $\alpha_{х.х.опт} \approx 5$  (см. рис. 3).

Заметим, что гарантированный пуск дизеля с первой попытки при устойчивом воспламенении первых порций впрыскиваемого топлива помимо сокращения продолжительности ввода ДГ 18 в работу имеет еще одно важное преимущество. В случае пропуска воспламенения первых порций топлива его несгоревшие пары попадают в коллектор вместе с отработавшими газами, а под действием высокой температуры последних, выбрасываемых вслед другими цилиндрами, может произойти их взрыв и возгорание слоя сажи в выхлопном тракте. Следовательно, смешанный способ привода ТКН, гарантируя запуск дизеля с первой попытки, повышает его пожаробезопасность. Это имеет принципиальное значение для безвахтенного обслуживания машинного отделения судна.

## Перевод нагрузки

В ДГ со свободным турбонаддувом прием нагрузки после его ввода в действие осуществляется с помощью только одного управляющего воздействия – увеличения цикловой подачи топлива (при одновременном уменьшении этой подачи у работающего генераторного агрегата – ГА). Повышение давления наддува, как замечено, отстает от увеличения подачи топлива, прием нагрузки ДГ происходит при заниженном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  и сопровождается неполным сгоранием топлива (с дымлением). Такой режим сгорания будет сохраняться до тех пор, пока не наступят установившиеся режимы ДГ и ТКСН. Следовательно, чтобы избежать дымления, перевод нагрузки с выводимого ГА нельзя проводить быстро. Иначе отставание степени свободного наддува воздуха от возрастающей подачи впрыскиваемого топлива будет еще более заметным. Если замена ГА вызвана неисправностью ранее работавшего агрегата, замедление вывода его из работы может обернуться усугублением нештатной ситуации.

В ДГ 18 со смешанным приводом ТКН 4, 5 управление процессом горения в цилиндрах выполняется, как замечено, посредством двух управляющих воздействий: синхронными и согласованными изменениями подачи топлива и давления наддувочного воздуха. Благодаря лучшим условиям сгорания горючей смеси в диапазоне малых нагруз-

зок ДГ скорость приема нагрузки может быть увеличена настолько, насколько это допустимо по условиям кратковременных механических перегрузок деталей цилиндрично-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Настолько же ускорится вывод из работы неисправного ГА и уменьшится вероятность развития нештатной ситуации. Синхронно-согласованное с подачей топлива изменение расхода и давления наддува достигается регулированием угловой скорости ТКН 4, 5 посредством управляемой ОЭМ 8, вводимой в этот период в двигательный режим.

### Режим раздельной работы

В статических режимах работы в диапазоне нагрузок ниже 30–40 % номинальной ДГ со свободным турбонаддувом работает неэкономично и недостаточно экологически безопасно, так как параметры отработавших газов и располагаемая мощность газовой турбины 4 (см. рис. 2, кривая 2) не могут обеспечить вращение его ТКН с угловой скоростью, необходимой для обеспечения оптимальных текущих значений производительности и коэффициента  $\alpha_{\text{опт.и}}$  избытка воздуха (см. рис. 2, кривая 1), что и приводит к неполному сгоранию впрыскиваемого топлива и повышению его удельного расхода (см. рис. 1). По этой причине продолжительная работа ДГ с нагрузкой ниже 30 % от номинальной, как замечено, неприемлема.

Иначе обстоит дело в ТКН со смешанным приводом. При работе ДГ с малыми нагрузками (см. рис. 2, зона А) недостающая мощность для работы ТКН с оптимальной производительностью подводится за счет ОЭМ 8, работающей в этом диапазоне нагрузок ДГ в двигательном режиме (см. рис. 2, кривая 3). По мере приема дизель-генератором нагрузки и роста параметров ОГ, вращающий момент его газовой турбины ТКН 4, 5 тоже увеличивается, а следовательно, электромагнитный вращающий момент, развиваемый его ОЭМ 8, следует автоматически уменьшать.

При нагрузке дизеля, составляющей примерно 30–40 % от номинальной, параметры ОГ достигают значений, при которых газовая турбина 4 способна самостоятельно обеспечить оптимальную производительность ТК 5. Поэтому ОЭМ 8 переходит при этой нагрузке ДГ 18 в режим холостого хода, фиксируемый датчиком 17 направления мощности (рис. 4). Дальнейший рост нагрузки ДГ

18, а также значений параметров его ОГ приводит к избыточному повышению давления наддувочного воздуха, создаваемому ТКН 4, 5. Чтобы не допустить передозировки степени наддува, в традиционном ТКСН прибегают к перепуску избыточного количества ОГ в выхлопную трубу, минуя газовую турбину 4. Вследствие этого энергия их теплоты теряется безвозвратно.

У ДГ, оборудованного ТКН 4, 5 со смешанным приводом, в указанном диапазоне нагрузок (см. рис. 2, зона В) ОЭМ 8 автоматически переводят по сигналу датчика направления мощности 17, посылаемому в блок адаптивного управления 16, в генераторный режим. Благодаря электромагнитному тормозному моменту, создаваемому ОЭМ 8 на валу ТКН 4, 5, последний притормаживают и понижают его производительность до значения, оптимального для данного нагрузочного режима ДГ 18. Вырабатываемая при этом ОЭМ 8 электроэнергия передается через обратимый СПП 9 в судовую электросеть с частотой основного генератора 18. Благодаря полезному использованию вторичных ресурсов отработавших газов КПД агрегата повышается.

А в переходных режимах, связанных с резким набросом значительных активных нагрузок, форсировка цикловой подачи топлива ДГ, снабженного ТКСН, как замечено, не сразу сопровождается адекватной форсировкой расхода и давления воздуха, из-за значительной инерционности подсистемы турбонаддува. В результате, как подчеркнуто в начале статьи, ухудшаются приемистость двигателя и качество электроэнергии в динамических режимах, а выхлоп ОГ получается дымным (сажистым) и токсичным.

При использовании ТКН 4, 5 со смешанным приводом из-за гибкости и безынерционности полупроводникового управляющего оборудования ОЭМ 8 становится возможным, практически мгновенно регулируя амплитуду и знак электромагнитного момента ОЭМ (с движущего на тормозной и обратно) на валу ТК 5, программно-принудительно и столь же форсированно изменять в переходных режимах производительность последнего, а следовательно, расход и давление наддувочного воздуха, синхронизируя и согласуя их с изменениями подачи топлива в момент наброса (или сброса) нагрузки [3].

В первом приближении оценку эффективности влияния технологии активного турбонаддува ДГ на экологические характеристики его работы в динамических режимах можно получить, сравнив результаты моделирования работы дизеля (фирмы «MAN B&W Høleby» типа 6L23/30  $N_e = 960$  кВт,  $n = 960$  мин<sup>-1</sup>,  $p_e = 1,8$  МПа) при набросе 50%-ной нагрузки с одновременным либо упреждающим принудительным разгоном ТКН по отношению к моменту наброса нагрузки, приведенные в [6]. Влияние синхронизированного либо упреждающего разгона ТКН дизеля на снижение концентрации сажи и оксидов азота в отработавших газах представлено в таблице и на рис. 5.

Из анализа данных таблицы и кривых рис. 5 следует, что наброс нагрузки на ДГ, сопровождаемый одновременным либо упреждающим разгоном его ТКН, снижает суммарную дымность в переходных режимах на дизеле типа 6L23/30 на 60 % по сравнению с исходным (базовым) режимом, а содержание оксидов азота

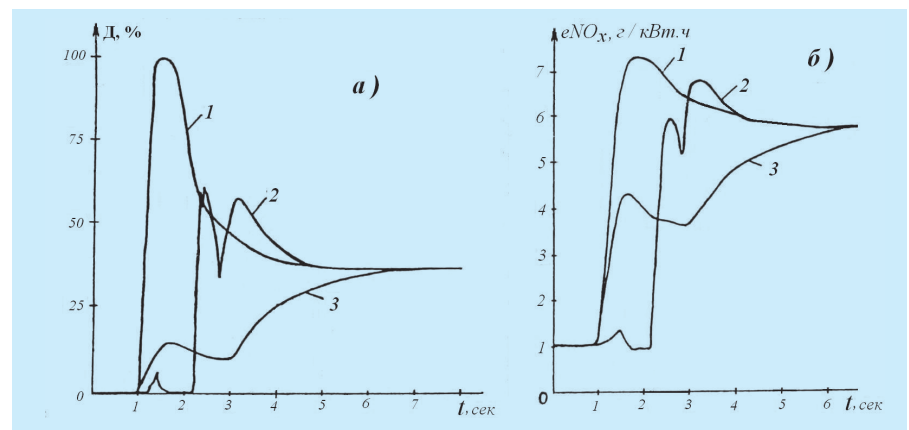


Рис. 5. Сравнение показателей дымности (а) и содержания оксидов азота (б) в отработавших газах дизеля на режимах [6]: 1 – исходный; 2 – с предварительным изменением задания на 5 % регулятора угловой скорости и его упреждением по отношению к набросу нагрузки 1, 2 с; 3 – с предварительным разгоном ТКН с упреждением к набросу нагрузки 1,0 с; Д – дымность, %

Результаты моделирования процесса предварительного разгона ТКН по отношению к моменту наброса нагрузки [6]

Время опережения момента разгона ТКН к моменту наброса нагрузки (подачи топлива), с	$eNO_x / eNO_{x, иск}^*$	Дымность / Дымность <sub>иск</sub> <sup>*</sup>	Провал частоты вращения, %
Исходный (без предварительного разгона ТКН)	1,0	1,0	2,6
0,0	0,69	0,35	2,5
1,0	0,68	0,33	2,5
2,0	0,74	0,44	2,5
3,0	0,85	0,59	2,5

\* Интегральный показатель за период переходного процесса: 4 с с момента подачи нагрузки

$NO_x$  – на 30–35 %. Снижение выбросов оксидов азота объясняется повышением давления и степени наполнения цилиндров воздухом в момент увеличения цикловой подачи топлива, что приводит к снижению максимальной температуры цикла, влияющей, как известно, на интенсивность реакции окисления азота.

**Режим остановки**

При выводе из работы ДГ со свободным турбонаддувом дизель останавливается практически сразу после прекращения подачи топлива. Давление в системе смазки, поддерживаемое навешенным насосом, резко падает, тогда как ТКШН еще продолжает вращаться в режиме свободного выбега под действием сил инерции. Кинетическая энергия вращающихся масс ТКШН расходуется на нагрев воздуха и подшипников без их охлаждения и смазки (если она жидкостная от навешенного насоса). Турбокомпрессор наддува, оборудованный ОЭМ, имеет возможность погасить свободное вращение ТК одновременно с остановкой дизеля вследствие форсированного электрического торможения ОЭМ 8. При этом кинетическая энергия вращающихся масс ТКН и ОЭМ преобразуется (рекуперирована) в электроэнергию и используется в приемниках электросети.

Если же остановка дизеля связана с аварийной ситуацией, вызвавшей его разнос, то она выполняется, как известно, одновременным прекращением подачи топлива (посредством топливной рейки ТНВД) и наддувочного воздуха (посредством воздушной заслонки 19 либо регулируемых сопел) со стороны входного патрубка центробежного турбокомпрессора ТКН. Это неминуемо вызывает помпаж последнего – опасный для него режим. В ТКН 4, 5, снабженном ОЭМ 8, помпажного режима удастся избежать, если применить описанную схему – перевести ОЭМ 8 в

режим экстренного электрического торможения и форсированной остановки ТК в тот момент, когда закрывают его воздушную заслонку 19 и прекращают подачу топлива.

Турбокомпрессор наддува со смешанным приводом от ОЭМ представляет собой разновидность турбокомпаундной системы, все шире используемой в последние годы на судах в качестве энергосберегающей технологии [7]. Из опыта использования этой системы на главных дизелях для получения электроэнергии во время движения судна известно, что при работе последнего с полной нагрузкой и при КПД его ТКН, составляющем 70 %, располагаемая мощность, развиваемая утилизируемым газотурбогенератором, составляет 5 и более % от номинальной мощности двигателя.

Следовательно, при расчете для дизель-генератора мощности газовой турбины, входящей в состав ТКН

со смешанным приводом, ее значение следует увеличить на указанные 5 % от номинальной мощности ДГ с учетом того, что в режиме работы ДГ с полной нагрузкой турбина будет вращать не только ТК 5, но и ОЭМ 8, работающую в генераторном режиме. Например, для ДГ номинальной мощностью 1,0 МВт с валом его ТКН следует сочленить ОЭМ мощностью 50 кВт и настолько же увеличить мощность его газовой турбины. Чтобы исключить установку между ОЭМ и ТК зубчатой передачи, увеличивающей инерционность ТКН, частота вращения электрической машины должна быть рассчитана на диапазон от 8,0 до 30,0 тыс. оборотов в минуту.

Использование предлагаемой для ДГ технологии активного турбонаддува технически не представляет сложности. Она опробована и используется с 2011 г. японской фирмой «Mitsubishi» [1] на судовых главных двухтактных двигателях (ГД). Ее серийно выпускаемый ТКН типа

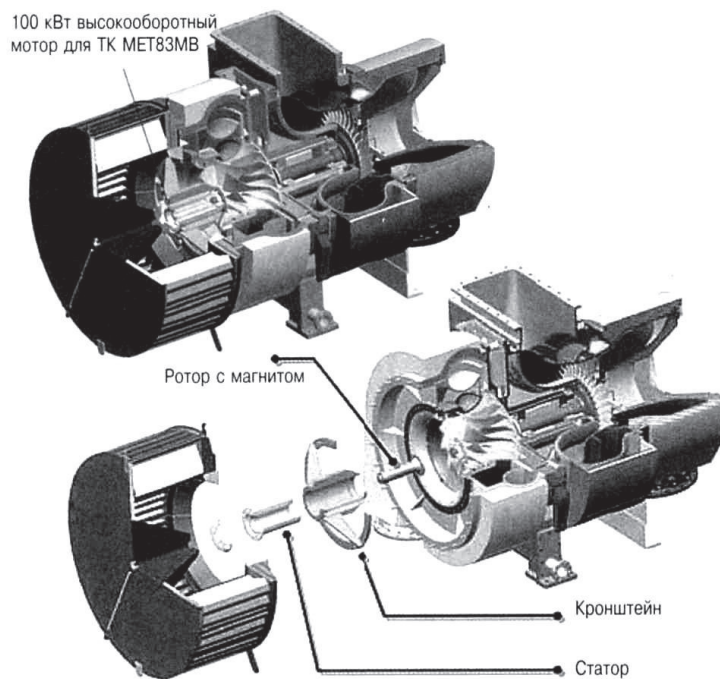


Рис. 6. Турбокомпрессор типа MET83MB фирмы «Mitsubishi» со смешанным приводом от встроенной высокооборотной электрической машины

МЕТ83МВ со смешанным приводом от встроенной электромашинной мощностью 100 кВт имеет вид, представленный на рис. 6. При работе ГД с малыми нагрузками встроенная электромашинная работает в режиме электродвигателя и заменяет вспомогательную воздуходувку. При этом мощность, затрачиваемая на создание требуемого давления наддува электроприводным ТКН, меньше, чем у вспомогательной воздуходувки, при меньших размерах и массе встроенной электромашинной. В режимах средней и полной нагрузки ГД последняя работает как генератор, подпитывая электрическую сеть.

Примечательно, что из-за использования воздушных подшипников данный агрегат работает без системы смазки [1, 8], а его обратимая синхронная машина вследствие возбуждения от постоянных магнитов лишена обмотки возбуждения, щеточно-кольцевого аппарата и возбуждителя, что снижает потери на ее возбуждение и существенно повышает надежность. Отметим, что поток охлаждающего воздуха для синхронной машины создается не ее обычной крылаткой, а лопатками ТК.

Микротурбозлектрические машины указанного диапазона мощностей разрабатываются и отечественным ООО «Микротурбинные технологии» в С.-Петербурге [9]. Это обстоятельство гарантирует возможность и целесообразность быстрого внедрения технологии с опорой на собственные ресурсы по схеме импортозамещения.

#### Литература

1. Циплэнкин Г. Е., Иовлев В. И. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува // Двигателестроение. 2014. № 2. С.1622.
2. Костин А. К., Пугачёв Б. П., Кочинев Ю. Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации / под общ. ред. А. К. Костина. Л.: Машиностроение, 1989. 284 с.
3. Пат. РФ № 2488708. МПК F02D 29/06, F02D 41/06. F01M 5/02, H02P 9/08. Способ автоматизированного управления синхронным дизель-генератором / П. М. Радченко, А. П. Данилович. Морск. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского. № 2011137398/06. Заяв. 09.09.2011. Оpubл. 27.07.2013. Бюл. № 21.

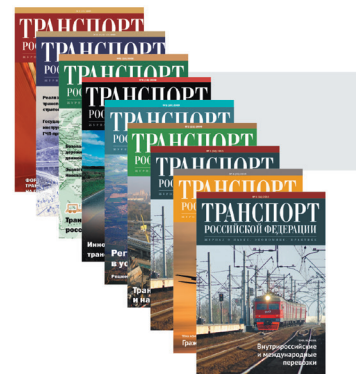
4. Данилович А. П., Радченко П. М., Экологичный и энергосберегающий турбонаддув дизель-генераторов // Матлы 9-й междунар. науч.-технич. конф. FEBRAT-11 «Проблемы транспорта ДВ». Владивосток: Морск. гос. ун-т, 2011. С. 156–157.
5. Левин М. И. Перспективы совершенствования автоматизированных дизель-генераторов // Судостроение. 1980. № 2. С. 25–28.
6. Абрамов Д. Н., Самсонов Л. А. Снижение вредных выбросов судовых вспомогательных двигателей в динамических режимах работы // Двигателестроение. 2001. № 2. С. 8–10.
7. Данилович А. П., Радченко П. М., Резник А. Г. Судовые энергосберегающие технологии с использованием турбокомпаундных систем // Матлы 8-й междунар. науч.-технич. конф. FEBRAT-09 «Проблемы транспорта ДВ». Владивосток: Морск. гос. ун-т, 2009. С. 120–123.
8. Дьяков А. Ф. Малая энергетика: проблемы и перспективы. М.: Энергопроект, 2003. 134 с.
9. Инновационные проекты морской техники: реклам. проспект. СПб.: МТТ НТЦ, 2012.

## Подписка

Подписка на журнал «Транспорт Российской Федерации» оформляется в любом отделении почтовой связи по объединенному каталогу «Пресса России», **подписной индекс 15094.**

Подписаться на журнал через редакцию можно в течение года с любого месяца,

- выслав заявку **по факсу (812) 310-40-97;**
- выслав заявку **по электронной почте [rt@rostransport.com](mailto:rt@rostransport.com);**
- или заполнив заявку **на сайте [www.rostransport.com](http://www.rostransport.com), раздел «Подписка».**



Подписку также можно оформить в агентствах:

«Книга-Сервис»,  
тел. (495) 680-90-88,  
<http://akc.ru>

«Урал-Пресс»  
тел. (495) 789-86-36