

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДВУХЭТАПНЫЙ НАДДУВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

*П.М. Радченко, к.т.н., профессор ВАК, профессор кафедры
Морской государственной университет им адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток
В.Е. Крашенинин, инженер-электромеханик судна
ОАО «Юником» (Владивостокский филиал ПАО «Совкомфлот»), г. Владивосток;
М.А. Макаев, аспирант
Морской государственной университет им адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток*

Рассмотрена технология воздухообеспечения судового дизель-генератора в переходных режимах, направленная на повышение полноты сгорания топлива, минимизацию образования токсичных компонентов отработавших газов, улучшение приемистости и повышение качества электроэнергии при внезапном набросе нагрузки.

Для генераторов судовых электростанций характерными являются часто повторяющиеся переходные режимы работы, обусловленные периодическими включениями и отключениями многочисленных потребителей электроэнергии, насчитывающих на автономных морских объектах десятки и даже сотни единиц. В периоды маневрирования судна, выполнения им швартовых операций и грузоподъемных работ собственными грузовыми средствами генераторные агрегаты практически непрерывно работают в квазипереходных режимах. Отмеченные режимы судовых электростанций наблюдаются также во время швартовок судов или стоянки их у причалов, включая порты, расположенные в центре населенных пунктов. Вследствие специфичности указанных режимов, протекающих при рассогласовании систем топливоподачи и воздухообеспечения, наблюдается повышенный уровень выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, что вызывает серьезную озабоченность экологическими последствиями их работы.

Работа дизеля, оборудованного обычным турбокомпрессором, при частых колебаниях нагрузки сопровождается, как известно, неполным сгоранием топлива и отложением сажи на всем протяжении выпускного тракта, закоксовыванием форсунок и выбросом в атмосферу продуктов неполного сгорания топлива. Причиной тому является недостаточная подача воздуха из-за инерционности ротора турбокомпрессора.



Рассмотренный процесс сгорания топлива усложняется, а его экологические показатели еще более ухудшаются, если в сети возникают часто повторяющиеся внезапные набросы и сбросы нагрузки. Обычный турбокомпрессор, обладая значительной инерционностью, характеризуется, как известно, отставанием по фазе изменения подачи воздуха в камеры сгорания по отношению к изменению подачи топлива, регулятор которого имеет значительно большее быстродействие. Это вызывает в период внезапного наброса нагрузки дефицит кислорода в камерах сгорания, что сопровождается повышенным дымлением и расходом топлива. При этом, наряду с ухудшением технико-экологических характеристик дизеля, ухудшаются и другие его эксплуатационные показатели — повышается пожароопасность, снижается ресурс.

Ухудшение приемистости при этом напрямую приводит к снижению качества производимой дизель-генератором электроэнергии: увеличению амплитуды колебания частоты напряжения в электросети судна и времени ее восстановления.

Устранение дымления в статических режимах низких нагрузок ДГ достаточно успешно решается посредством объединения турбокомпрессора с электрической машиной—двигателем-генератором

турбокомпаундной системы (ТКС) вспомогательного дизеля [1–3], когда вал этой машины соединяется соосно с валом турбокомпрессора (рис. 1). Электрически двигатель-генератор ТКС подключается к главному распределительному щиту электростанции через обратимый статический полупроводниковый преобразователь (СПП). Эффективность такого решения рассмотрена в [2, 4]. В частности, в рассматриваемом диапазоне низких нагрузок для восполнения дефицита вращающего момента, развиваемого турбиной, двигатель-генератор турбокомпаундной системы ДГ используют в режиме электродвигателя [2–4]. Повышая производительность турбокомпрессора до оптимального значения для текущего нагрузочного режима ДГ, обеспечивают полное сгорание топлива без дымления и меньшим объемом вредных выбросов.

Когда же нагрузка ДГ превысит примерно 50 % номинального значения, мощность, развиваемая турбиной, становится избыточной. Во избежание перепуска части отработавших газов ДГ, обладающих еще достаточно высоким энергетическим потенциалом, в атмосферу двигатель-генератор ТКС переводится посредством обратимого СПП в генераторный режим. Преобразуя избыточную энергию отработавших газов в электрическую ее

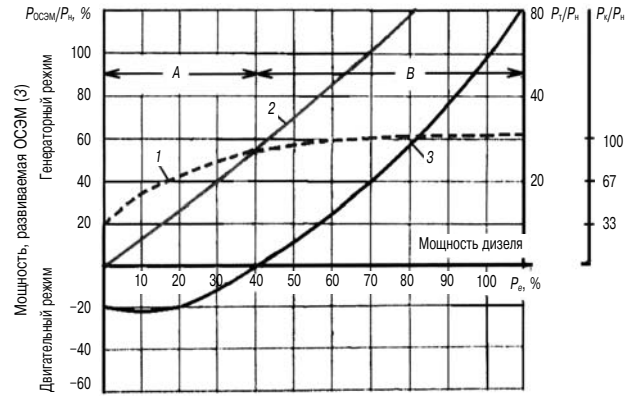


Рис. 2. Энергетические характеристики ТЭНА

направляют ее в электросеть судна. В режиме номинальной нагрузки ДГ КПД его двигателя увеличивается примерно на 5 % [1, 4]. Энергетические характеристики турбоэлектронаддувочного агрегата (ТЭНА) во всем диапазоне статических нагрузок ДГ представлены на рис. 2. Функции двигатель-генератора ТКС может выполнять, в частности, синхронная машина.

Вместе с тем при использовании в качестве двигатель-генератора отдельной серийной машины с бесщеточным электромагнитным возбуждением динамические характеристики ТЭНА не только

не улучшаются, но даже несколько ухудшаются. Объясняется это тем, что для согласования частот вращения обычного турбокомпрессора ($n_n = 30\,000$ об/мин) и серийного двигатель-генератора ($n_n = 3000$ либо 3600 об/мин) требуется установка редуктора. Вместе с самим присоединяемым двигатель-генератором и встроенным в него возбудителем они увеличивают маховую массу всего ТЭНА, понижая его быстродействие. При набросе нагрузки на ДГ это дополнительно затягивает время изменения подачи воздуха в камеры сгорания и ухудшает в большей степени показатели приемистости двигателя ДГ. В результате, улучшая экономические и экологические характеристики работы ДГ в статических режимах, турбоэлектроприводной компрессор ухудшает их в переходных режимах по сравнению с показателями обычного наддува. Устранить этот недостаток можно разными способами.

1. Использовать принцип комбинированного двухэтапного регу-

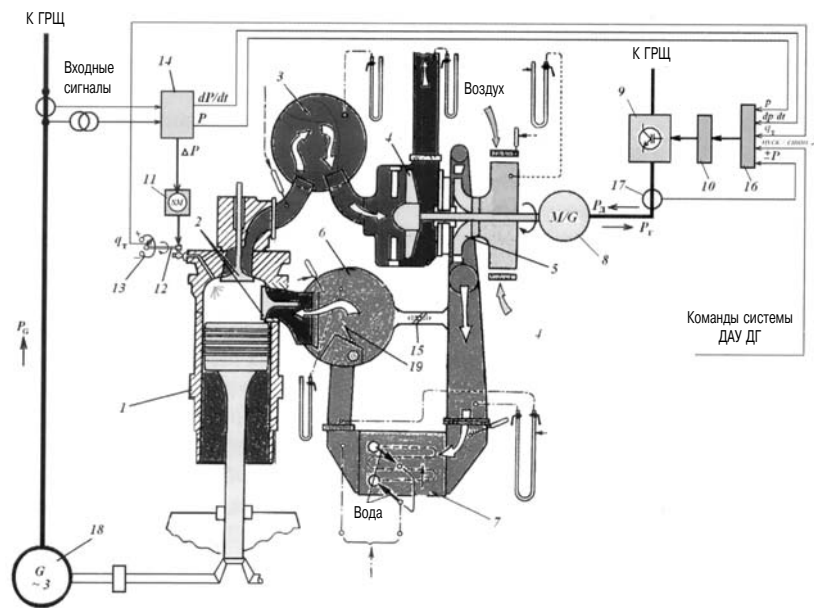


Рис. 1. Турбоэлектронаддувочный агрегат (ТЭНА) двигателя дизель-генератора:

1 — цилиндр; 2 — впускной и выпускной клапаны; 3 — коллектор отработавших газов; 4 — утилизирующая газовая турбина; 5 — турбокомпрессор; 6 — ресивер; 7 — воздухоохладитель; 8 — двигатель-генератор турбокомпаундной системы; 9 — статический полупроводниковый преобразователь (СПП); 10 — система управления СПП; 11 — механический регулятор подачи топлива; 12 — топливная рейка ТНВД; 13 — датчик подачи топлива; 14 — датчик активной мощности ДГ; 15 — байпасный воздушный клапан; 16 — блок логического управления давлением наддувочного воздуха; 17 — реверсивный датчик мощности двигатель-генератора; 18 — синхронный генератор; 19 — воздушная заслонка; SM — серводвигатель

лирования подачи воздуха в камеры сгорания двигателя ДГ, основанный на том, что на первом этапе, учитывая инерционность ТЭНА, синхронно с увеличением подачи топлива подают на лопатки рабочего колеса турбокомпрессора сжатый воздух из воздушного резервуара, и одновременно форсируют увеличение производительности турбокомпрессора воздействием на изменение режима двигатель-генератора посредством его обратимого СПП; на втором этапе подачу воздуха под давлением прекращают, а производительность турбокомпрессора после увеличения вращающего момента, развиваемого турбиной, корректируют теми же средствами в соответствии с новым статическим нагрузочным режимом ДГ.

2. Увеличить быстродействие, надежность, долговечность безредукторного ТЭНА с пристроенным к турбокомпрессору [5] либо встроенным в него [6] высокооборотным двигатель-генератором с постоянными магнитами в комплекте с безынерционным СПП на силовых транзисторах.

Целью настоящей статьи является разработка и исследование комбинированного двухэтапного способа регулирования подачи наддувочного воздуха при внезапном изменении нагрузки на ДГ по первому способу.

Принципиально-функциональная схема систем регулирования подачи топлива и наддувочного воздуха ДГ, реализующая данный способ, представлена на рис. 3.

Двигатель 1 синхронного генератора 2 оборудован ТЭНА, состоящим из турбоэлектрокомпрессора 3, приводимого во вращение газовой турбиной 4 и серийным синхронным двигатель-генератором 5 в бесщеточном исполнении, соединенным с валом обычного турбокомпрессора 3-4 через зубчатую передачу 6. Двигатель-генератор 5 подключен к шинам 7 главного распределительного щита (ГРЩ) через автоматический выключатель 8 (QF2) и обратимый СПП 9 со звеном постоянного тока. СПП состоит из обратимых электромашинного 10 (UZ1) и сетевого 11 (UZ2) полупроводниковых преобразователей, снабженных подсистемами управления (ПСУ) соответственно 12 и 13. Обмотка 14 возбуждения возбуждителя 33 бесщеточного двигатель-генератора 5 получает питание от независимого выпрямителя-подвозбудителя 15 управления. Преобразователи UZ1, UZ2 и UZ3 выполнены на безынерционных силовых транзисторах типа IGBT.

Двигатель 1 ДГ оборудован механическим регулятором 17 подачи топлива (МРПТ), серводвигателем 18 и датчиком 19 топливоподачи (положения топливной рейки), а генератор 2 — датчиком 20 активной мощности, формирующим при изменении нагрузки на ДГ сигналы первой производной $\pm dP/dt$, статической нагрузки P и приращения $\pm \Delta P$ статической нагрузки. Турбоэлектрокомпрессор 3 двигателя 1 связан воздухопроводом 21 с резервуаром 25 сжатого воздуха и оборудован дополнительно рециркуляционным трубопроводом 22. Оба этих трубопровода снабжены управляемыми клапанами 23 и 24.

Система комбинированного двухэтапного регулирования подачи наддувочного воздуха состоит из указанного датчика 20 активной мощности ДГ, блока 26 логического управления (БЛУ) двигатель-генератором 5 и блока управления 27 переходным режимом (БУПР). При вводе ДГ в работу запуск двигателя 1 ДГ его пусковой системой и запуск турбоэлектрокомпрессора 3 посредством двигатель-генератора 5 в его электродвигательном режиме производятся одновременно по сигналу подсистемы 28 дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) дизель-генератором 1-2. Причем запуск ТЭНА производят с некоторым упреждением для обеспечения к моменту впрыска топлива в камеры сгорания избыточного коэффициента $\alpha_{в\ изб}$ воздуха, гарантирующего запуск двигателя с первой попытки [3, 4].

Наброс нагрузки на ДГ, развивающий мощность менее 50 % от номинальной. В период работы ДГ с частичной нагрузкой менее 50 % от номинальной при внезапном набросе нагрузки в момент време-

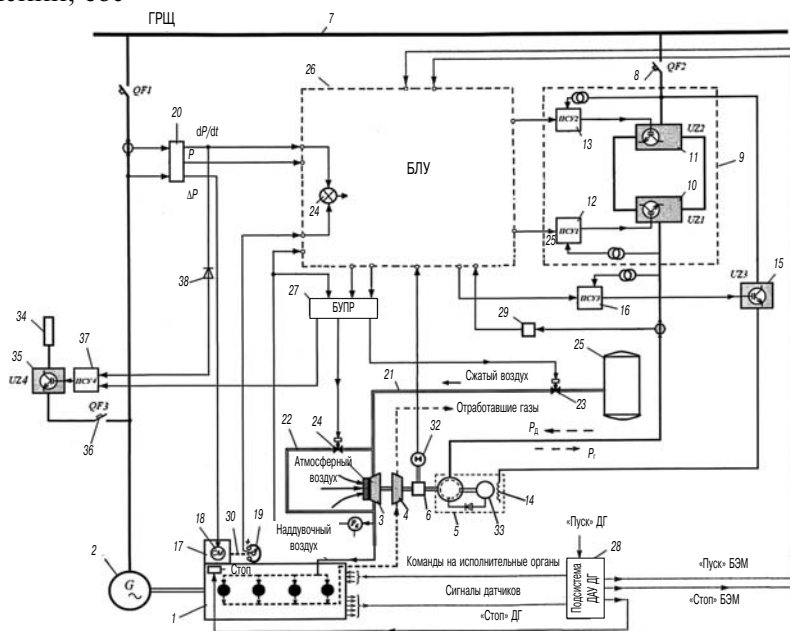


Рис. 3. Принципиально-функциональная схема регулирования подачи топлива и воздуха в ДГ в переходных режимах наброса/сброса нагрузки

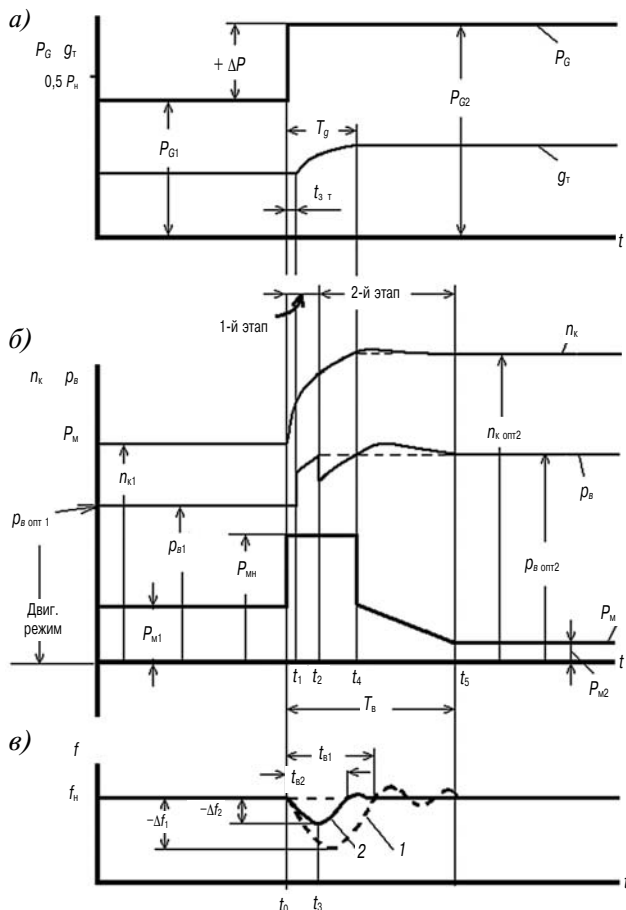


Рис. 4. Внезапный наброс нагрузки на дизель-генератор в режиме его работы со статической нагрузкой менее 50 %-ой от номинальной:

$t_{3\tau}$ — постоянная времени (задержка) подачи топлива

ни t_0 (рис. 4, а — кривая P_G) измеряют датчиком 20 активной мощности сигналы $+dP/dt$, $+\Delta P$ и P . На первом этапе переходного процесса сигналом $+dP/dt$ динамического приращения нагрузки, посылаемым в блок 26 логического управления двигателем-генератором 5, с некоторым упреждением воздействуют на режим его работы с целью форсированного увеличения производительности турбоэлектрокомпрессора 3. При этом характер этого воздействия зависит от текущего нагрузочного режима ДГ, а следовательно, и режима двигателя-генератора 5 турбокомпаундной системы — двигательного или генераторного. Он определяется знаком информационного сигнала, формируемого реверсивным датчиком мощности 29 двигателя-генератора 5 и также посылаемого в БЛУ 26.

В период работы ДГ со статической нагрузкой менее 50 % от номинальной двигатель-генератор 5 работает в поддерживающем двигательном режиме (рис. 4, б — кривая P_M), развивая мощность P_{M1} . Поэтому для форсировки производительности турбоэлектрокомпрессора 3 сигналом $+dP/dt$, направленным в БЛУ 26, воздействуют затем на

ПСУ2 (13) сетевым преобразователем 11, работающем в данном режиме выпрямителем. Увеличивают скачком в момент t_0 его напряжение в цепи постоянного тока СПП 9, что вызывает всплеск электромагнитного вращающего момента двигателя-генератора 5 и потребляемой им мощности P_M до номинального значения P_{MH} (рис. 4, б — кривая P_M).

Следом сигналом $+\Delta P$ приращения статической нагрузки ДГ воздействуют на серводвигатель 18 двигателя 1. Перемещая топливную рейку 30 МРПТ 17, увеличивают с задержкой $t_{3\tau}$, равной постоянной времени МРПТ 17, подачу топлива в камеры сгорания двигателя 1. При этом сигнал изменения топливоподачи, измеряемый датчиком 19, посылают в блок 26 логического управления двигателем-генератором 5 (для подтверждения ранее посланного в него упреждающего сигнала $+dP/dt$ динамического приращения) и одновременно в БУПР 27. Последний сигналом на выходе «1» открывает в момент t_1 управляемый клапан 23. Воздух, поданный из воздушного резервуара 25 на лопатки рабочего колеса турбоэлектрокомпрессора 3, почти скачком вызывает увеличение давления воздуха в камерах сгорания (рис. 4, б — кривая p_B) одновременно с увеличением подачи топлива (рис. 4, а — кривая g_t). В результате возросшее количество впрыскиваемого топлива сгорает практически полностью в условиях сохранения оптимального для него значения коэффициента избытка воздуха, т. е. без образования сажи и с минимальным образованием токсичных газов.

Под действием возросшего вращающего момента двигателя-генератора 5 и нарастающего вращающего момента турбины 4, вызванного увеличением энергетического потенциала отработавших газов двигателя 1, в промежутке времени t_1-t_2 частота вращения турбоэлектрокомпрессора 3 (рис. 4, б — кривая n_k) и давление воздуха (рис. 4, б — кривая p_B) в ресивере б (рис. 1) форсированно нарастают. Давление воздуха в этом ресивере измеряют датчиком 31 и направляют в БУПР 27 и БЛУ 26 (рис. 3).

В момент t_2 , когда давление воздуха становится равным программно заданному в БУПР 27 значению $p_{B\text{ опт}2}$ (рис. 4, б — кривая p_B), в этом блоке формируется сигнал закрытия клапана 23, вследствие чего давление воздуха несколько снижается. И на этом 1-й этап переходного процесса наброса нагрузки на ДГ завершается.

На 2-м этапе, в промежутке t_2-t_4 , давление воздуха снова нарастает под действием продолжающегося повышения частоты вращения турбоэлектрокомпрессора 3 (рис. 4, б — кривая n_k), измеряемой датчиком 32 частоты вращения. В момент t_4 , когда давление воздуха повторно до-

стигает значения $p_{в\text{ опт}2}$ (рис. 4, б — кривая $p_{в}$), а сигнал частоты вращения — значения $n_{к\text{ опт}2}$ (рис. 4, б — кривая $n_{к}$), в блоке 26 формируется сигнал возвращения двигатель-генератора 5 в предшествующий двигательный режим. Им также воздействуют на подсистему 13 управления сетевым полупроводниковым преобразователем 11.

Однако к этому моменту потенциал отработавших газов двигателя 1 и вращающий момент турбины 4 увеличиваются настолько, что производительность турбоэлектрокомпрессора 3 становится избыточной для нового установившегося нагрузочного режима P_{G2} дизель-генератора (рис. 4, а — кривая P_G), как и давление воздуха в ресивере 6. Поэтому по сигналу разности $p_{в} - p_{в\text{ опт}2}$ в блоке 26 формируется сигнал снижения электромагнитного вращающего момента, развиваемого двигатель-генератором 5, которым, воздействуя на ту же подсистему 13 управления сетевым полупроводниковым преобразователем 11 устанавливают в момент t_5 давление наддувочного воздуха равным $p_{в\text{ опт}2}$ (рис. 4, б — кривая $p_{в}$), соответствующее новому значению мощности P_{M2} двигатель-генератора 5 (рис. 4, б — кривая P_M).

Наброс нагрузки на ДГ, развивающий мощность выше 50 % от номинальной. При данной нагрузке ДГ бесщеточный двигатель-генератор 5 его турбокомпаундной системы работает до наброса нагрузки в генераторном режиме (рис. 5, б — кривая P_M), например, с нагрузкой P_{M1} . Об этом режиме БЛУ 26 оповещается сигналом обратной полярности реверсивного датчика мощности 29 двигатель-генератора 5. Чтобы форсировать увеличение частоты вращения турбокомпрессора 3, в момент t_0 сигналом $+dP/dt$, формируемым датчиком 20 активной мощности ДГ и посылаемым в блок 26, меняют скачкообразно режим двигатель-генератора 5 с генераторного на номинальный двигательный режим $P_{Mн}$ (рис. 5, б — кривая P_M). Это достигается реверсированием потока мощности этой машины посредством обратимого безынерционного СПП 9 по команде блока 26.

В промежутке $t_0 - t_4$ (рис. 5, а, б) операции, выполняемые системами регулирования топливо- и воздухоподачи по сигналу $+dP$ того же датчика активной мощности 20, повторяют уже ранее рассмотренные на (рис. 4, а, б). В частности, в момент t_2 после закрытия клапана 23 подачи воздуха из воздушного резервуара 25 давление наддувочного воздуха несколько снижается (рис. 5, б — кривая $p_{в}$). Затем оно снова нарастает по мере форсированного увеличения частоты вращения $n_{к}$ и производительности турбоэлектрокомпрессора 3. В момент t_4 , когда давление воздуха в ресивере становится равным оптимальному значению $p_{в\text{ опт}2}$ для нового статического нагрузочного режима ДГ, в блоке 26 формируют сигнал возвра-

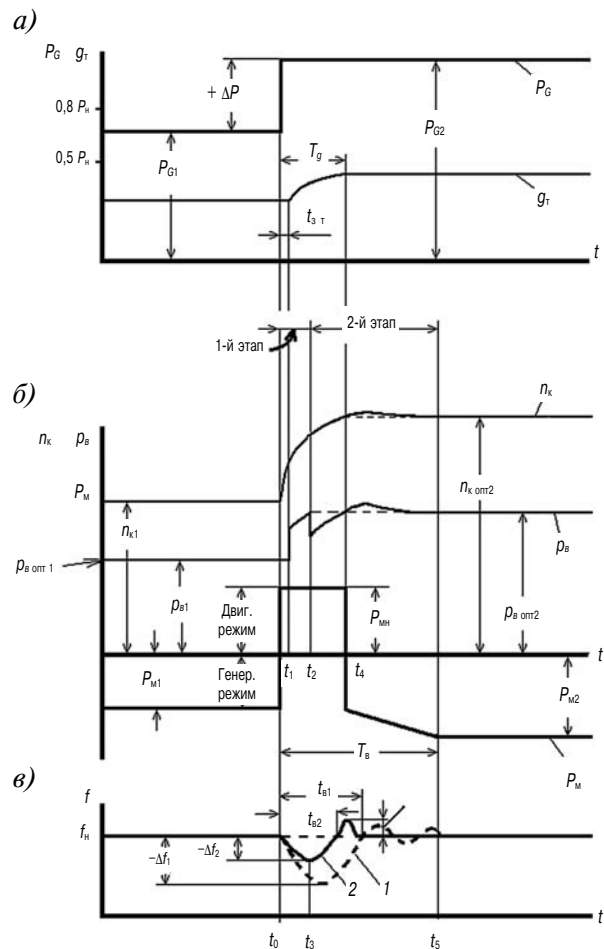


Рис. 5. Временные диаграммы при внезапном набросе нагрузки на дизель-генератор в режиме его работы со статической нагрузкой более 50 %-ой от номинальной

щения двигатель-генератора 5 в предшествующий генераторный режим (рис. 5, б — кривая P_M), который посылают в подсистемы 12 и 13 обратимыми 10 и 11 преобразователями СПП 9.

Но к данному моменту времени t_4 вращающий момент, развиваемый турбиной 4 под действием возросшего энергетического потенциала отработавших газов двигателя 1 и накопленной ТЭНА кинетической энергии в период форсированного увеличения его частоты вращения, становится избыточным. Вследствие этого давление воздуха $p_{в}$ переходит в область перерегулирования. Тогда по сигналу разности $p_{в} - p_{в\text{ опт}2}$, формируемому в том же блоке 26 и посылаемому на подсистему 16 (ПСУЗ) управления независимым выпрямителем-подвозбудителем 15, увеличивают напряжение, ток возбуждения и электромагнитный тормозной момент, развиваемый двигатель-генератором 5 в генераторном режиме до установления большей статической мощности P_{M2} (рис. 5, б — кривая P_M). Благодаря возросшему притормаживанию турбоэлектрокомпрессора 3 его производительность уменьшается, и давление наддува к

Результаты моделирования процесса наброса 50 %-ной нагрузки на дизель-генератор с предварительным разгоном его турбокомпрессора наддува

Время опережения разгона турбокомпрессора к моменту наброса нагрузки (подачи топлива), с	$eNO_x / eNO_{x\text{ исх}}$	Дымность / Дымность исх.	Провал частоты вращения, %
Исходный режим с обычным ТК	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	,52

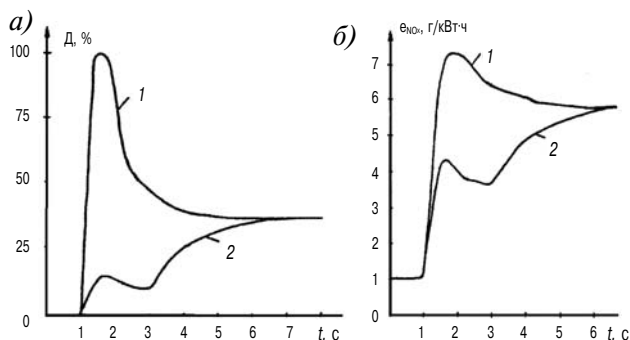


Рис. 6. Показатели дымности (а) и содержания оксидов азота (б) в отработавших газах двигателя ДГ в режимах [7]:

1 — исходный для обычного турбокомпрессора, 2 — с предварительным разгоном турбокомпрессора с опережением 1,0 с

моменту t_5 снижается до оптимального значения $p_{в\text{ опт}2}$ для нового установившегося нагрузочного режима P_{G2} дизель-генератора (рис. 5, б — кривая p_b).

На рис. 4, в и рис. 5, в представлена эффективность двухэтапного комбинированного регулирования воздухоподачи ДГ в отношении приемистости двигателя 1, обусловленная более полным сгоранием топлива в момент внезапного наброса нагрузки, выразившимся в снижении провала $-\Delta f$ частоты напряжения в электрической сети со значения $-\Delta f_1$ до $-\Delta f_2$, а времени ее восстановления — со значения $t_{в1}$ до $t_{в2}$. В итоге качество электроэнергии улучшается.

В первом приближении оценку экологической эффективности данного комбинированного способа регулирования воздухоподачи в ДГ можно получить, сравнив результаты моделирования работы вспомогательного дизеля (фирмы «MAN B&W Holedy» типа 6L23/30 $P_e = 960$ кВт, $n = 960$ об/мин, $p_e = 1,8$ МПа) при набросе 50 %-ной нагрузки с одновременным либо упреждающим принудительным разгоном турбокомпрессора двигателя по отношению к моменту на-

броса нагрузки, приведенные в [7]. Влияние синхронизированного либо упреждающего разгона турбокомпрессора на дымность ОГ и содержание оксидов азота (eNO_x) представлены на рис. 6 и в таблице.

Из анализа данных таблицы и рис. 6 следует, что

наброс нагрузки на ДГ, сопровождаемый одновременным либо упреждающим разгоном его турбокомпрессора, снижает суммарную дымность в переходных режимах на дизеле типа 6L23/30 на 60 % по сравнению с исходным (базовым) режимом, а содержание оксидов азота eNO_x — на 30–35 %. Снижение выбросов оксидов азота объясняется повышением давления и степени наполнения цилиндров в момент увеличения цикловой подачи топлива, что приводит к снижению температуры цикла, влияющей, как известно, на интенсивность реакции окисления азота.

Литература

1. Данилович А.П., Радченко П.М., Резник А.Г. Судовые энергосберегающие технологии с использованием турбокомпаундных систем: доклад на 8-й Междунар. НПК «Проблемы транспорта ДВ — FEBRAT-09». Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2009. С. 120–126.
2. Данилович А.П., Радченко П.М. Энергосберегающий турбонаддув дизель-генераторов: доклад на 9-й Междунар. НПК «Проблемы транспорта ДВ—FEBRAT-11». — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. С. 156–157.
3. Пат. РФ № 2488708. МПК F02D 29/06, F02D 41/06, F01M 5/02, H02P 9/08. Способ автоматизированного управления дизель-генератором / П.М. Радченко, А.П. Данилович. Мор. гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского. № 2011137398/06. Заявл. 09.09.2011. Оpub. 27.07.2013. Бюл. № 21.
4. Радченко П.М., Резник А.Г., Данилович А.П. Адаптивный турбонаддув дизель-генераторов // Транспорт РФ. Морской и речной транспорт. Судостроение. 2015. № 4 (59). 53 с.
5. Инновационные проекты морской технологии: реклам. проспект. СПб.: МТТ НТЦ, 2012. 1 с.
6. Цыплёнкин Г.Е., Иовлев В.И. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува // Двигателестроение. 2014. № 2. С. 16–22.
7. Абрамов Д.Н., Самсонов Л.А. Снижение вредных выбросов судовых вспомогательных двигателей в динамических режимах работы // Двигателестроение. 2001. № 2. С. 8–10.