

На правах рукописи



**АЛЕШКОВ Олег Алексеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
ПЕРВИЧНОГО ДИЗЕЛЯ В СОСТАВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ОПТИМИЗАЦИЕЙ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА**

05.04.02 - Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул-2009

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе  
«Научно-исследовательский институт автотракторной техники»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кукис Владимир Самойлович  
Научный консультант кандидат технических наук, доцент  
Малоземов Андрей Адиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Лебедев Борис Олегович  
кандидат технических наук, доцент  
Кузьмин Алексей Геннадьевич

Ведущая организация ЗАО «Научно-производственный центр  
малой энергетики» (г. Москва)

Защита состоится 6 ноября 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038 г. Барнаул, пр. им. В.И. Ленина, 46 (тел/факс (3852) 26 05 16; E-mail: D21200403@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан \_\_\_\_ сентября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р. техн. наук, профессор



А.Е. Свистула

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для энергообеспечения районов России с децентрализованным энергоснабжением используется около 49,5 тыс. дизель-генераторных установок суммарной мощностью 17 млн. кВт и с выработкой электроэнергии около 50 млрд. кВт·ч в год. Расход топлива этими электростанциями составляет около 6 млн. т у.т. В качестве генерирующих объектов автономных систем энергоснабжения целесообразно применение многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) на базе гибридных энергоустановок. В качестве базы МЭК предлагается двигатель-генераторная установка, работающая совместно с ветроэлектростанцией, либо другим возобновляемым источником энергии (ВИЭ). Особенностью установки является работа на оптимальном, с точки зрения топливной экономичности, скоростном режиме, зависящем от нагрузки.

Развитие МЭК является сравнительно новым направлением в энергетике. Поэтому в настоящее время недостаточно глубоко проработана его научная основа. Отсутствуют методы оптимизации скоростного режима ДВС в зависимости от нагрузки и с учетом различных ограничивающих и влияющих факторов (установленной мощности, качества электроэнергии, уровня выбросов вредных веществ, наличия системы утилизации, надежности, затрат на эксплуатацию и др.), нет адаптированных для решения конкретных инженерных задач методов предварительной оценки возможного снижения удельного расхода топлива, отсутствуют результаты экспериментальных исследований, подтверждающих возможность реализации и эффективности предложенного технического решения.

**Цель настоящего исследования** – повысить топливную экономичность первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проанализированы особенности функционирования первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса.
2. Обоснован выбор математической модели рабочего процесса поршневого ДВС применительно к предмету и цели исследования.
3. Расчетно-теоретически и экспериментально оценено влияние различных факторов на параметры, определяющие топливную экономичность первичного дизеля и многофункционального энерготехнологического комплекса: 1) удельный эффективный расход топлива первичным дизелем, 2) энергетический баланс первичного дизеля и потенциал утилизации сбросового тепла, 3) энергетические потери в системах МЭК (инверторе,

генераторе и т. п.). Оценена адекватность использованной математической модели.

4. С использованием результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований обоснован алгоритм функционирования системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала первичного двигателя, обеспечивающий максимально возможную топливную экономичность многофункционального энерготехнологического комплекса с учетом ограничивающих параметров назначения и безопасности.

5. Разработана методика экономической оценки влияния частоты вращения коленчатого вала и других факторов на топливную экономичность многофункционального энерготехнологического комплекса на базе дизелей.

**Объект исследования** – рабочий процесс в первичных дизелях ОАО «ПО Алтайский моторный завод» и ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод) размерностью 13/14 различного конструктивного исполнения.

**Предмет исследования** – процессы, формирующие топливную экономичность первичного дизеля многофункционального энерготехнологического комплекса, и зависимость этих характеристик от его скоростного режима, конструктивных и регулировочных параметров.

**Научную новизну** имеют следующие положения, выносимые на защиту:

1. Система критериев энергетической эффективности МЭК.

2. Комплексная мультифизическая математическая модель МЭК, включающая подмодели: первичного дизеля, трансмиссии, всережимного генератора, преобразователя частоты, ветроэлектрической установки, электрической нагрузки, основанная на системах дифференциальных уравнений массового и энергетического балансов, кинематики и динамики, электромагнетизма, гидродинамики и позволяющая определять основные статические и динамические характеристики многофункционального энерготехнологического комплекса на стандартных и нестандартных режимах нагружения.

3. Результаты экспериментальной оценки топливной экономичности энергоустановки при работе с переменной частотой вращения.

4. Аналитические зависимости параметров энергетической эффективности МЭК (КПД, удельный расход топлива) на базе первичных дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 от скоростного и нагрузочного режимов и основных конструктивных характеристик элементов энергоустановки.

5. Основные положения методики оптимизации скоростного режима первичного дизеля в составе МЭК.

6. Методика оценки экономической эффективности МЭК в реальных условиях эксплуатации (с учетом переменной частоты вращения и графика нагрузки).

**Практическая ценность.** Результаты исследования позволяют обеспечить максимальную экономию топлива при работе МЭК на базе двигателя 8ЧН13/14 по оптимальной характеристике до 27 %. В реальных условиях эксплуатации экономия для электростанций на базе дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 составит около 4,6 %. Материалы диссертации могут быть использованы при создании МЭК и их систем, модификаций первичных дизелей, предназначенных для работы в составе МЭК, модернизации существующих ДВС-электростанций, при проведении НИР и ОКР, в учебном процессе.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертации используются и внедрены: в ЗАО «Научно-производственный центр малой энергетики» (г. Москва) - при разработке и проведении полевых испытаний многофункционального энерготехнологического комплекса на базе ветроэлектростанции «Заполярная» (г. Воркута); ОАО «ПО Алтайский моторный завод» (г. Барнаул) - при разработке модификаций дизелей для энергоустановок; НП «Сертификационный центр автотракторной техники» (г. Челябинск) - при проведении испытаний дизелей и энергоустановок.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были доложены и одобрены на заседаниях НТС ОАО «НИИ автотракторной техники» (г. Челябинск, 2006, 2007, 2008, 2009); научно-технической конференции «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин» (г. Челябинск, 2008); на второй всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (г. Барнаул, 2008).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано восемь печатных работ, в том числе две в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и содержание работы.** Диссертация содержит 165 с., в том числе 89 рисунков, 24 таблицы, и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 107 наименований, и приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, поставлена цель, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, дана её общая характеристика и изложено краткое содержание.

В **первой главе** проанализированы актуальные вопросы повышения топливной экономичности энергоустановок на базе поршневых ДВС. Показано, что современное состояние автономных систем энергоснабжения на

базе ДВС-электростанций характеризуется высокой долей затрат (до 80 %) на топливо в суммарных издержках на эксплуатацию ДЭС, повышенным (на 30 %), по сравнению с номинальным, удельным расходом топлива на производство электрической энергии вследствие работы первичного дизеля на режимах неполной нагрузки, большими безвозвратными потерями энергии в системах охлаждения, смазки и с отработавшими газами, широким использованием дизелей Алтайского и Ярославского моторных заводов для привода энергоустановок (до 50 % от суммарной установленной мощности), недостаточным использованием потенциала возобновляемых источников энергии. Одним из возможных решений изложенных проблем является развитие МЭК на базе гибридных энергоустановок с переменной частотой вращения и системой утилизации сбросового тепла.

**Вторая глава** посвящена совершенствованию методов математического моделирования функционирования МЭК. Была предложена система критериев эффективности АСЭС с поршневыми ДВС (рис. 1), которая является основой для создания методики оптимизации параметров МЭК.

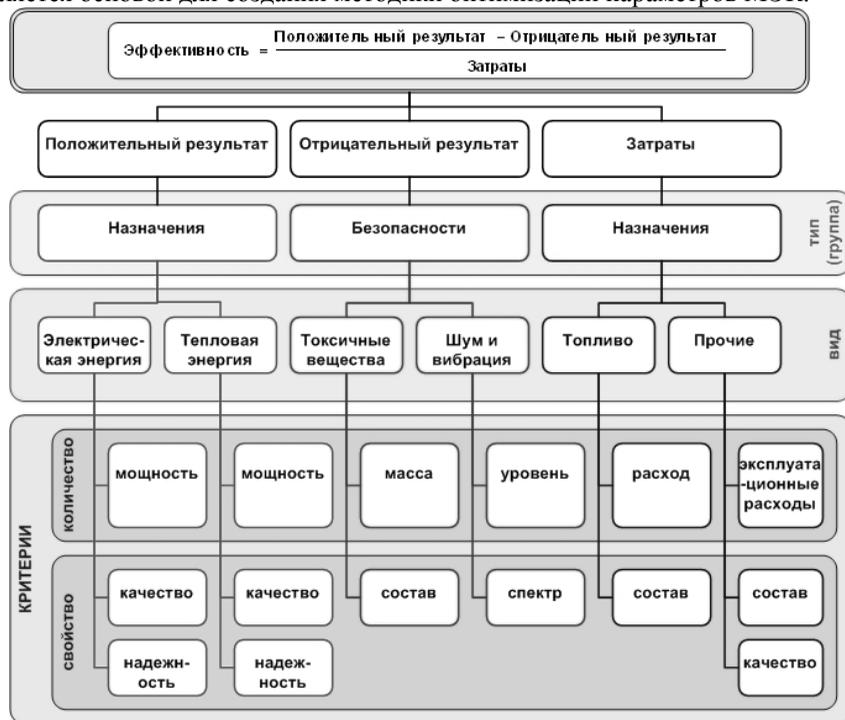


Рис. 1. Система критериев эффективности АСЭС с поршневыми ДВС

Предложена комплексная мультифизическая математическая модель МЭК, включающая подмодели: первичного дизеля, трансмиссии, всережимного генератора, преобразователя частоты, ветроэлектрической установки, электрической нагрузки, основанная на системах дифференциальных уравнений массового и энергетического балансов, кинематики и динамики, электромагнетизма, гидродинамики и позволяющая определять основные статические и динамические характеристики многофункционального энерготехнологического комплекса на стандартных и нестандартных режимах нагружения (рис. 2).

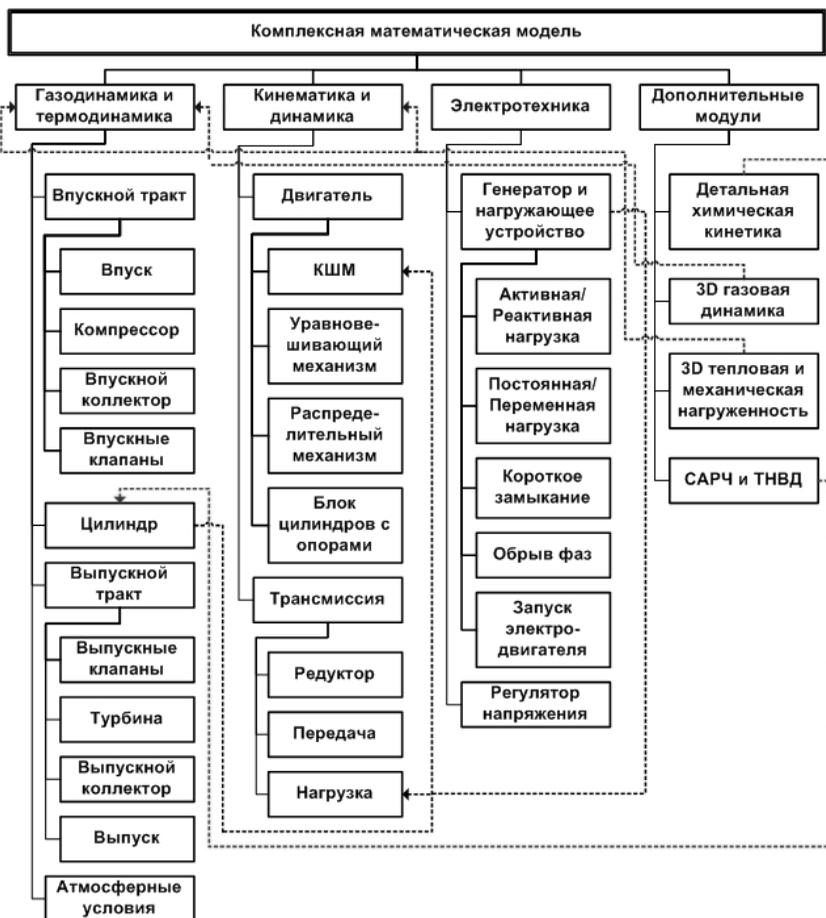


Рис. 2. Иерархическая структура математической модели двигатель-генератора в составе МЭК и системы нагружения

Математическая модель первичного поршневого ДВС включает уравнения энергетического, массового балансов и состояния рабочего тела в камере сгорания:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{d\varphi} &= (H_u \delta q_u \frac{dx}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + \frac{dQ_n}{d\varphi} - \frac{dQ_m}{d\varphi} - u \frac{dG'}{d\varphi} - u'' \frac{dG''}{d\varphi} - \frac{dL}{d\varphi}) \frac{1}{C_v(G' + G'')} \\ \frac{dG'}{d\varphi} &= \frac{dG'_n}{d\varphi} - \frac{dG'_m}{d\varphi} - G_0 q_u \frac{dx}{d\varphi} \\ \frac{dG''}{d\varphi} &= \frac{dG''_n}{d\varphi} - \frac{dG''_m}{d\varphi} + (G_0 + 1) q_u \frac{dx}{d\varphi} \\ P &= \frac{(G' + G'')RT}{V} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $P$ ,  $V$ ,  $G$  – текущие температура, давление, объем и масса рабочего тела соответственно;  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива;  $\delta$  – коэффициент эффективности сгорания;  $\partial x / \partial \varphi$  – характеристика выгорания топлива,  $q_u$  – цикловая подача топлива,  $G_0$  – масса воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива;  $dQ_w$  – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе теплообмена со стенками цилиндра;  $dQ_n$  – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе наполнения цилиндра;  $dQ_m$  – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе очистки цилиндра;  $dL$  – элементарная работа цикла;  $u$  – удельная внутренняя энергия рабочего тела;  $dG_n$  – элементарное количество газа, поступившего в цилиндр через впускной клапан;  $dG_m$  – элементарное количество газа, вышедшего из цилиндра через выпускной клапан;  $C_v$  – удельная теплоемкость воздуха;  $dG_p$  – элементарное уменьшение массы рабочего тела вследствие утечки через зазор между поршнем и цилиндром;  $dG_s$  – элементарное увеличение массы рабочего тела вследствие подачи сжатого воздуха;  $R$  – универсальная газовая постоянная. Символы « ' » и « '' » относятся к воздуху и продуктам сгорания соответственно.

Кроме того, в модель входят закон выгорания И.И. Вибе, уравнение для определения коэффициента теплопередачи через стенки камеры сгорания Вошни, формула для определения элементарного расхода воздуха через проходные сечения впускных и выпускных клапанов.

С использованием разработанной математической модели выполнена расчетная оценка влияния различных факторов на параметры, определяющие топливную экономичность МЭК. Расчет проводился по плану полного факторного эксперимента для дизелей 1Ч13/14 и 1ЧН13/14. Варьируемыми параметрами являлись частота вращения и нагрузка двигателя. Критерием оптимизации являлся параметр удельного эффективного расхода топлива

при заданной мощности, параметром оптимизации – частота вращения первичного дизеля. Пример зависимости эффективного удельного расхода топлива дизеля 1ЧН13/14 от частоты вращения приведен на рис. 3.

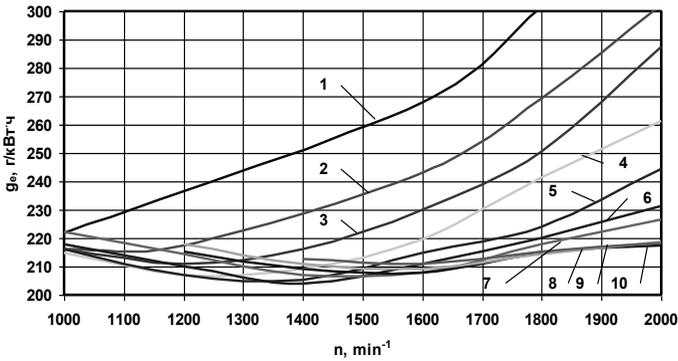


Рис. 3. Расчетная зависимость эффективного удельного расхода топлива дизеля 1ЧН13/14 от частоты вращения для  $N_e$ , кВт:  
1- 5,5; 2 – 7,3; 3 – 9,2; 4 – 11,0; 5 – 12,8; 6 – 14,7; 7 – 16,5; 8 – 18,3; 9 – 20,2; 10 – 22,0

Полученные зависимости аппроксимировались квадратичными регрессионными уравнениями, аналогичными приведенному ниже для двигателя 1ЧН13/14:

$$\eta_i = 30,8 - 26,0 \cdot N'_e + 70,0 \cdot n' - 7,55 \cdot N'^2_e + 39,6 \cdot N'_e \cdot n' - 56,8 \cdot n'^2, \quad (2)$$

где  $n'$ ,  $N'_e$  – относительные (от номинальных) частота вращения и эффективная мощность двигателя.

Анализ результатов расчетно-теоретического исследования показал, что основной «вклад» в повышение топливной экономичности первичного дизеля энергоустановки при снижении частоты вращения вносит уменьшение механических и насосных потерь.

Уменьшение механических и насосных потерь на 2...3,5 кВт/цилиндр и 0,4...0,6 кВт/цилиндр для 1Ч13/14 и 1ЧН13/14 соответственно (в диапазоне  $n=1000 \dots 1500 \text{ мин}^{-1}$ ) влечет увеличение эффективного КПД, при этом максимум КПД смещается в сторону более низкой частоты вращения. Соответствующим образом изменяется положение минимума эффективного удельного расхода топлива.

Работа первичного дизеля на переменном скоростном режиме эффективна с точки зрения топливной экономичности только в диапазоне от нулевой до определенной нагрузки (для дизеля без наддува – 12 кВт, для двигателя с наддувом – 14 кВт).

Количество потенциально утилизируемого тепла дизеля в составе энергоустановки с переменной частотой вращения в общем случае мень-

ше, чем с постоянной частотой вращения на величину до 10...15 % при нагрузках ниже средней.

Зависимость относительного изменения КПД электрической части МЭК от частоты вращения первичного дизеля приведена на рис. 4 (исследования особенностей функционирования преобразователя частоты в составе МЭК были проведены проф. д.т.н. Ю.Г. Шакарьяном и проф. д.т.н. А.Е. Загорским (ОАО Научно-исследовательский институт электроэнергетики)).

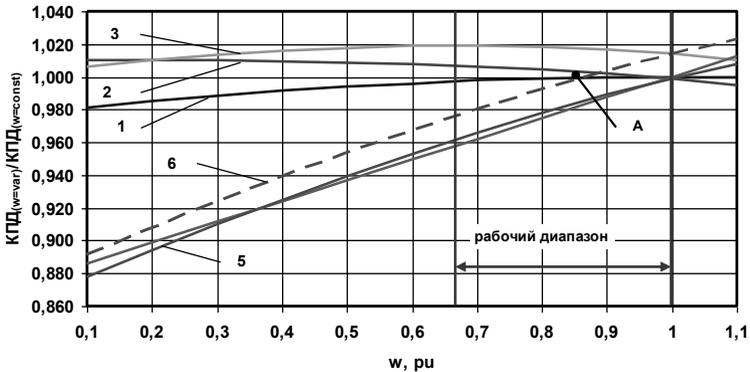


Рис. 4. Зависимость относительного изменения КПД электрической части МЭК от частоты вращения коленчатого вала первичного дизеля:

1 – электрический КПД генератора, 2 – механический КПД генератора, 3 – суммарный КПД генератора (с учетом повышения  $\cos \varphi$  с 0,8 до 1,0), 4 – КПД преобразователя частоты, 5 – суммарный КПД электрической части МЭК ( $\cos \varphi = 0,8$ ), 6 – суммарный КПД электрической части МЭК (с учетом повышения  $\cos \varphi$  с 0,8 до 1,0)

При относительной частоте вращения  $w$  (pu) 0,87 механические потери всережимного генератора равны потерям в обычном генераторе. При снижении частоты вращения до 0,67 механические потери снижаются примерно в три раза, что компенсирует уменьшение на 0,25...0,40 % электрического КПД. КПД преобразователя частоты в рабочем диапазоне энергоустановки изменяется в пределах от 0,995 (при номинальных нагрузке и частоте вращения) до 0,952 (при коэффициенте нагружения 0,2 и  $w = 0,67$ ). По отношению к генератору ПЧ представляет собой активную нагрузку, что позволяет дополнительно снизить потери в генераторе на 1...1,5 %.

В *третьей главе* приведены результаты экспериментального исследования топливной экономичности первичных дизелей энергоустановок. Эксперимент проводился в три этапа. На первом этапе были проведены стендовые испытания дизелей 4ЧН13/14 (Д-442) и 6Ч13/14 (А-01) производства ОАО «ПО Алтайский моторный завод». Выбор объектов обуслов-

лен тем, что дизели этой размерности широко используются для привода ДГУ мощностью 60...100 кВт, результаты исследования могут быть распространены как на дизели с газотурбинным наддувом, так и без него. На втором этапе в условиях стенда была испытана энергоустановка номинальной мощностью 200 кВт на базе дизеля 8ЧН13/14 (ЯМЗ-7514) производства ОАО «Автодизель», укомплектованная всережимным генератором (разработанным и изготовленным ОАО «Баранчинский электромеханический завод») и преобразователем частоты модели «Liebert NXA». В ходе третьего этапа проведены полевые испытания МЭК с двигатель-генератором на базе дизеля 8ЧН13/14 в составе ВЭС «Заполярная» (г. Воркута). Двигатель-генератор с преобразователем частоты и системой управления был смонтирован на шасси КамАЗ.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирические зависимости удельного эффективного расхода топлива от нагрузки и частоты вращения. Для дизеля 6Ч13/14 уравнение имеет вид:

$$g_e = 347,2 - 1,356 \cdot N_e - 0,0882 \cdot n + 0,0308 \cdot N_e^2 - 0,0024 \cdot N_e \cdot n + 8,768 \cdot 10^{-5} \cdot n^2, \quad (3)$$

для 4ЧН13/14:

$$g_e = 293,2 - 0,487 \cdot N_e - 0,0973 \cdot n + 0,0138 \cdot N_e^2 - 0,0015 \cdot N_e \cdot n + 8,258 \cdot 10^{-5} \cdot n^2. \quad (4)$$

Поиск экстремума уравнений (5) и (6) позволяет получить оптимальную, с точки зрения топливной экономичности, зависимость частоты вращения от нагрузки для дизеля 6Ч13/14:

$$n = 13,7 \cdot N_e + 469, \quad (5)$$

для дизеля 4ЧН13/14:

$$n = 9,1 \cdot N_e + 589. \quad (6)$$

Экономия топлива при работе отдельно взятого двигателя по оптимальной характеристике может достигать 12...19 % при нагрузке менее 25 % от номинальной (рис. 5). Сравнение результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования показало, что для дизеля 6Ч13/14 величина среднего квадратичного отклонения расчетных и эмпирических значений удельного эффективного расхода топлива (при работе по нагрузочной характеристике) – 0,9936, для 4ЧН13/14 – 0,9774.

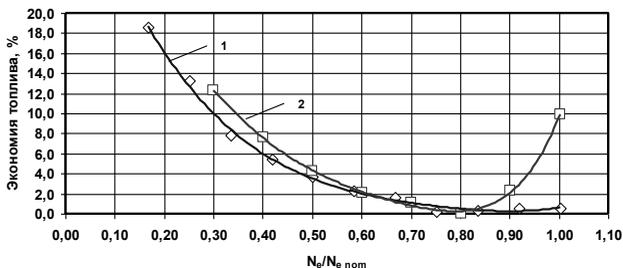


Рис. 5. Потенциальная экономия топлива при работе двигателей 4ЧН13/14 и 6Ч13/14 по оптимальной, с точки зрения минимизации удельного эффективного расхода топлива, нагрузочной характеристике:  
1 – 4ЧН13/14, 2 – 6Ч13/14

Величина среднего квадратического отклонения расчетных и эмпирических значений потерь тепла с ОГ дизеля 6Ч13/14 – 0,9936, для 4ЧН13/14 – 0,9774.

Статистическая обработка данных многопараметровой характеристики двигатель-генератора на базе дизеля 8ЧН13/14 показала, что удельный расход топлива энергоустановкой может быть выражен с помощью квадратичной регрессионной зависимости:

$$g_{\text{э}} = 414 - 0,908 \cdot N_{\text{э}} - 0,226 \cdot n + 0,0114 N_{\text{э}}^2 + 0,00165 N_{\text{э}} \cdot n + 0,000172 n^2 \quad (7)$$

Аналогично формулам, полученным для первичных дизелей:

$$n = 4,801 \cdot N_e + 656. \quad (8)$$

Оптимальные характеристики САРЧ двигатель-генератора и отдельных двигателей приведены на рис. 6.

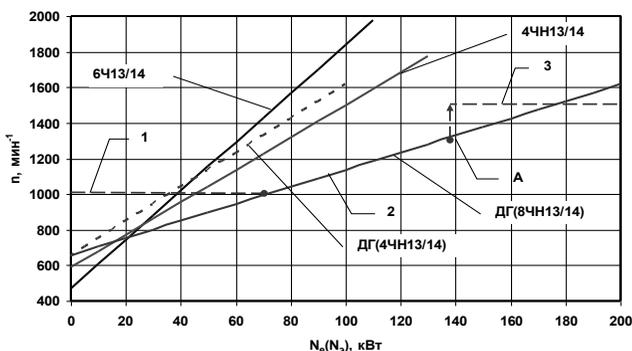


Рис. 6. Оптимальная, с точки зрения минимизации удельного эффективного расхода топлива, характеристика САРЧ двигателей 4ЧН13/14 и 6Ч13/14 и двигатель-генераторов на базе 8ЧН13/14 и 4ЧН13/14

Как видно из рисунка, линия, соответствующая оптимальной характеристике САРЧ отдельно взятого первичного дизеля, ниже, чем линия, соответствующая оптимальной характеристике САРЧ энергоустановки.

С точки зрения обеспечения работоспособности двигателя и всережимного генератора минимальная частота вращения должна быть ограничена величиной  $1000 \text{ мин}^{-1}$  (для других моделей двигателей и генераторов возможны иные значения) – участок 1 на рис. 6. Максимальную частоту вращения целесообразно ограничить величиной  $1300 \text{ мин}^{-1}$  (точка А на рис. 6), так как при большей частоте увеличивается удельный расход топлива. Положение точки А определяется потерями в электрооборудовании энергоустановки, если они превышают экономию топлива, полученную в результате снижения частоты вращения первичного дизеля, двигатель должен быть переведен на номинальную частоту вращения, а преобразователь отключен. Это решение также способствует повышению ресурса ПЧ. В итоге, алгоритм САРЧ должен соответствовать ломаной линии 1–2–3.

Потенциальная экономия топлива при работе энергоустановки с всережимным генератором и ПЧ на базе дизеля 8ЧН13/14 по оптимальной, с точки зрения минимизации удельного эффективного расхода топлива, нагрузочной характеристике показана на рис. 7.

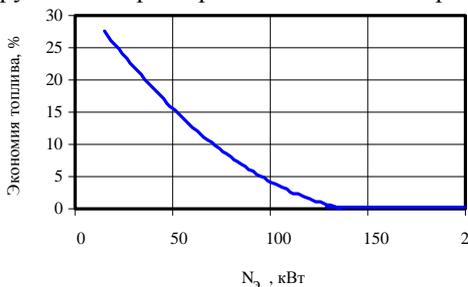


Рис. 7. Потенциальная экономия топлива при работе энергоустановки с всережимным генератором и ПЧ на базе дизеля 8ЧН13/14 по оптимальной, с точки зрения минимизации удельного эффективного расхода топлива, нагрузочной характеристике

Полевые испытания энергоустановки показали:

- работа системы автоматического регулирования частоты вращения, обеспечивающей алгоритм скоростного режима, обоснованный в результате настоящего исследования, устойчива во всём диапазоне изменения нагрузки, алгоритм САРЧ полностью реализуется;
- показатели качества электроэнергии на нагрузке (выход источника бесперебойного питания) сохраняются без отклонений от требований нормативно-технической документации на всех режимах, включая аварийное отключение двигатель-генератора;
- функционирование МЭК при работе с ВЭУ и двигатель-генератора устойчивое, деление нагрузок при максимальном использовании мощности ВЭУ автоматическое. Подтверждена правильность технических реше-

ний и адаптивность МЭК при оптимизации энергопотребления от ВЭУ и двигатель-генератора.

В *четвертой главе* обоснована экономическая эффективность мероприятий по оптимизации скоростного режима первичного дизеля МЭК.

Для оценки экономической эффективности предлагаемых технических решений была предложена методика, основанная на режимах нагружения, имеющих место в реальных условиях эксплуатации. Расчет для МЭК на базе дизеля 8ЧН13/14 показал, что при стоимости дизельного топлива 27,4 руб./кг годовые затраты на его приобретение могут быть снижены на 374 тыс. рублей. При стоимости преобразователя частоты мощностью 200 кВт 1430 тыс. руб. он окупится за 3,8 лет, что ниже нормативного срока окупаемости капиталовложений (7 лет) и нормативного срока эксплуатации ПЧ (10 лет). Можно ожидать, что действительный ресурс ПЧ составит не менее 30 лет, так как он будет задействован только 7 часов в сутки. Годовой недоотпуск тепла составит 26 МВт, что в денежном выражении эквивалентно 8104 руб. или 2,2 % от экономии топлива за счет перевода энергоустановки на режим работы с переменной частотой вращения. Столь малым значением можно пренебречь, особенно с учетом того, что выработка тепла для энергоустановки не является основной функцией.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате исследования:

1. Разработана комплексная мультифизическая математическая модель МЭК, включающая подмодели: первичного дизеля, трансмиссии, всережимного генератора, преобразователя частоты, ветроэлектрической установки, электрической нагрузки, и позволяющая определять основные статические и динамические характеристики МЭК на стандартных и нестандартных режимах нагружения.

2. Установлено, что с понижением частоты вращения коленчатого вала первичных дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 индикаторный КПД в рабочем диапазоне режимов нагружения снижается на 2...8 %. Однако уменьшение механических и насосных потерь на 2...3,5 кВт/цилиндр и 0,4...0,6 кВт/цилиндр соответственно (в диапазоне  $n = 1000...1500 \text{ мин}^{-1}$ ) влечет увеличение эффективного КПД, при этом максимум КПД смещается в сторону более низкой частоты вращения. Соответствующим образом изменяется положение минимума эффективного удельного расхода топлива.

3. При относительной частоте вращения  $w = 0,87$  механические потери всережимного генератора равны потерям в обычном генераторе. При снижении частоты вращения до  $w=0,67$  механические потери снижаются примерно в три раза, что компенсирует некоторое уменьшение (на 0,25...0,40 %) электрического КПД. Относительный КПД преобразователя

частоты в рабочем диапазоне энергоустановки изменяется в пределах от 0,995 (при номинальных нагрузке и частоте вращения) до 0,952 (при коэффициенте нагружения 0,2 и  $w=0,67$ ).

4. Оптимальный алгоритм изменения частоты вращения может быть получен минимизацией функциональной зависимости удельного эффективного расхода топлива от нагрузки и частоты вращения с использованием математических методов поиска экстремума. В качестве исходных данных используются многопараметровые характеристики, полученные экспериментальным или расчетным путем.

5. Минимальная частота вращения первичного дизеля должна быть ограничена наибольшим из значений, определяемых технической характеристикой двигателя и генератора. Максимально допустимая частота вращения первичного дизеля определяется следующим условием: удельный расход топлива энергоустановкой не должен превышать расход базовой установки с постоянной частотой вращения. Для дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 диапазон варьирования относительных частот вращений составляет 0,67...0,87. При величине потерь в преобразователе частоты, превышающей экономию топлива от снижения частоты вращения первичного дизеля, целесообразно выводить преобразователь частоты из работы, используя встроенный байпас, и устанавливать посредством САУ номинальную частоту вращения ДВС. Кроме повышения КПД электрической части МЭК это способствует повышению ресурса преобразователя частоты примерно в три раза.

6. Максимальная экономия топлива при работе МЭК на базе двигателя 8ЧН13/14 по оптимальной характеристике может достичь 27 %. В реальных условиях эксплуатации экономия будет ниже и для электростанций на базе дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 составит около 4,6 %.

7. Изменение частоты вращения влечет снижение количества потенциально утилизируемого тепла в реальных условиях эксплуатации на 4 %, однако в денежном выражении это составляет 2,2 % (8 тыс. руб.) от экономического эффекта, связанного с повышением топливной экономичности. Поэтому при оптимизации изменение теплового баланса первичного дизеля может не учитываться.

8. Расчет с использованием разработанной методики оценки экономической эффективности многофункционального энерготехнологического комплекса в реальных условиях эксплуатации (с учетом переменной частоты вращения и графика нагрузки) показал, что годовые затраты на приобретение топлива для МЭК на базе дизеля 8ЧН13/14, работающего в населенном пункте с сельскохозяйственным производством, могут быть снижены на 374 тыс. рублей. Срок окупаемости преобразователя частоты мощностью 200 кВт 3,8 лет, что ниже нормативного срока окупаемости

капиталовложений 7 лет и нормативного срока эксплуатации преобразователя частоты 10 лет.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

*а) в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. **Алешков, О.А.** Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе / О.А. Алешков, А.А. Малоземов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 199-209.

2. **Алешков, О.А.** Топливная экономичность многофункционального энерготехнологического комплекса с переменной частотой вращения первичного дизельного двигателя / А.А. Малоземов, О.А. Алешков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. – Вып. 1. – Новосибирск: ФГОУ ВПО «НГАВТ», 2009. – С. 191-192.

*б) в других изданиях:*

3. **Алешков, О.А.** Анализ тенденций развития малой и нетрадиционной энергетики / О.А. Алешков // Научный вестник ЧВВАКИУ. – Вып. 19. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2007. – С. 143–148.

4. **Алешков, О.А.** Эффективность использования топливозергетических ресурсов в гибридных энергоустановках / А.А. Малоземов, О.А. Алешков, // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – С. 50–62.

5. Алешков О.А. Сравнительный анализ параметров тракторных дизелей зарубежного и отечественного производства / О.А. Алешков // Материалы второй всероссийской научно-практической конференции с международным участием (1–4 октября 2008, АлтГТУ им. И.И. Ползунова) «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики». – Барнаул, 2008. – С. 203–206.

6. **Алешков, О.А.** Повышение топливной экономичности первичного дизеля энергоустановки оптимизацией скоростного режима / А.В. Копеин, А.А. Малоземов, О.А. Алешков // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы науч.-техн. конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2008. – С. 31–34.

7. **Алешков, О.А.** Оценка энергетической эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в автономных многофункциональных энергетических комплексах / В.С. Кукис, А.А. Малоземов, О.А. Алешков // Известия Международной академии аграрного образования. – Вып. 7 (2008). – Том 1. – СПб, 2008. – С. 126–130.

8. **Алешков, О.А.** Оценка влияния частоты вращения коленчатого вала на экономические показатели первичного дизеля гибридной энергетической установки / О.А. Алешков, А.В. Тананыкин // Научный вестник ЧВВАКИУ. – Вып. 20. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2009. – С. 113–138.