



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253

УДК 620.424.1

Научная статья

Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов

И.Я. Редько^а, А.А. Малозёмов^б, Г.А. Малозёмов^б, А.В. Наумов^б, Д.В. Козьминых^б

^аАО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 19

^бЮжно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76

История статьи:

Поступила в редакцию: 10 декабря 2020 г.

Доработана: 22 января 2021 г.

Принята к публикации: 27 января 2021 г.

Ключевые слова:

многофункциональный энерготехнологический комплекс, инверторная энергоустановка, двигатель внутреннего сгорания, эффективность, расход топлива, ресурс, выбросы вредных веществ

Аннотация. Разработана методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функционирования двигателя внутреннего сгорания с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения. Методика включает: синтез оптимального алгоритма управления частотой вращения двигателя, определение режимов функционирования комплекса в условиях эксплуатации, оценку изменения величины расхода топлива и выбросов вредных веществ с отработавшими газами, скорости расходования ресурса при переводе двигателя на режим работы с оптимальной частотой вращения, комплексную технико-экономическую оценку эффективности использования инверторных энергоустановок. На примере инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт доказана необходимость применения методики. Выявлено, что работа двигателя с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения и без дополнительных конструктивных мероприятий влечет увеличение скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза и поэтому экономически нецелесообразна, несмотря на снижение расхода топлива на 1 % и более. Установлено, что снижение степени сжатия при одновременном повышении давления наддува позволяет повысить ресурс двигателя до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 % и до параметрического отказа вследствие изнашивания на 32 %, при этом затраты на эксплуатацию инверторной энергоустановки снизятся на 3,7 % относительно базовой (без изменений) энергоустановки. Показатели выбросов сажевых частиц уменьшатся примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %, углеводородов – практически до нуля.

Редько Иван Яковлевич, заместитель генерального директора АО «ЭНИИ», д. т. н., профессор; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041; redko_iva@mail.ru.

Малозёмов Андрей Адиевич, профессор кафедры колесных и гусеничных машин ЮУрГУ (НИУ); д. т. н., доцент; WOS Research ID: M-5743-2018, Scopus Author ID: 57170613800, eLIBRARY SPIN-код: 6622-7711.

Малозёмов Георгий Андреевич, студент факультета математики, механики и компьютерных технологий ЮУрГУ (НИУ); Scopus Author ID: 57170613800.

Наумов Алексей Владимирович, начальник учебной части, заместитель начальника кафедры танковых войск ЮУрГУ (НИУ).

Козьминых Дмитрий Владимирович, соискатель кафедры колесных и гусеничных машин ЮУрГУ (НИУ).

© Редько И.Я., Малозёмов А.А., Малозёмов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Введение

В 2020 году исполняется 100 лет плану ГОЭЛРО, ставшему первым масштабным планом развития экономики СССР. Возглавлял Государственную комиссию по электрификации Г.М. Кржижановский, чьи научные труды легли в основу принципов электрификации страны и чье имя носит Энергетический институт, которому в 2020 году исполнилось 90 лет. План ГОЭЛРО предусматривал постройку 30 электростанций, приближенных к залежам топлива (торф, уголь, горючий сланец) и возобновляемым источникам энергии (реки), для снабжения промышленности электроэнергией в радиусе до 70 км. В настоящее время, несмотря на существование единой энергетической системы, принцип размещения генерирующих мощностей вблизи запасов топлива и местах наличия возобновляемых энергоресурсов остается одним из основополагающих, так как позволяет существенно снизить потери энергии при ее транспортировке к потребителю, особенно это актуально для децентрализованных систем, обеспечивающих энергией около 70 % территории РФ.

В Энергетической стратегии России на период до 2035 года [1] указано, что одним из приоритетов является развитие региональной энергетики с увеличением уровня надежности обеспечения энергоресурсами территорий при опережающем развитии распределенной генерации, экономически эффективном использовании местных источников топлива и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доктрина энергетической безопасности (утверждена Президентом РФ 29 ноября 2012 года) [2] предусматривает повышение степени самообеспечения энергетическими ресурсами регионов РФ и отдельных потребителей посредством освоения местных видов топлив и развития малой энергетики (в том числе на основе ВИЭ).

Одним из способов решения проблем энергообеспечения удаленных от единой энергосистемы территорий является создание и внедрение многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) на основе инверторных гибридных энергоустановок, объединяющих двигатель-генератор (ДГ), работающий с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения, зависящей от нагрузки, и ВИЭ [3]. Наличие ВИЭ и работа ДГ с переменной частотой вращения определяют использование преобразователя частоты тока (инвертора) [4], ко-

торый обеспечивает показатели качества электрической энергии, соответствующие требованиям к сетям общего назначения. Внешний вид опытного образца МЭК показан на рис. 1.



Рис. 1. Опытный образец МЭК на базе ВЭС «Заполярная» (из архива авторов)

[Figure 1. A prototype of a multifunctional energy complex based on the “Zapolyarnaya” wind farm (from the authors' archive)]

Инверторные энергоустановки относительно новое направление в сфере малой энергетики, которое появилось в 90-х годах XX века и начало интенсивно развиваться только в XXI веке [5; 6]. Исследованиями в этой области занимались многие зарубежные (D. Cherus, J.F. Manwell [5], R. Bram, J. Leuchter [4]) и отечественные (С.Г. Обухов, И.А. Плотников [7], Б.В. Лукутин, О.С. Хватов [8]) ученые. При реализации оптимального с точки зрения топливной экономичности алгоритма управления первичным ДВС существенно увеличивается тепловая и механическая нагрузка на детали двигателя, следовательно, снижаются показатели его надежности, изменяются показатели выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Однако при создании инверторных ДГ эти негативные последствия практически не

учитываются. В существующих математических моделях инверторных ДГ, используемых при их создании и конструктивной доводке, ДВС представлен в крайне упрощенном виде (например, описан эмпирическими регрессионными зависимостями), не позволяющим учесть особенности его функционирования и необходимость ограничения тепловой и механической нагруженности двигателя при реализации оптимального алгоритма управления частотой вращения коленчатого вала, обеспечения нормативных значений выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Отсутствует методика комплексной технико-экономической оценки затрат на эксплуатацию инверторных ДГ и МЭК в реальных условиях.

Таким образом, целью исследования является разработка и апробация методики комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функционирования ДВС с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения.

1. Методы

Методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК основана на математических методах их имитационного моделирования и включает:

- синтез оптимального алгоритма управления частотой вращения первичного ДВС;
- определение режимов функционирования МЭК в условиях эксплуатации;
- оценку изменения величины расхода топлива при переводе инверторной ДГ на режим работы с оптимальной частотой вращения;
- определение изменения скорости расходования ресурса при переводе инверторной ДГ на режим работы с оптимальной частотой вращения;
- оценку изменения величины выбросов вредных веществ с отработавшими газами первичного ДВС при работе с оптимальной частотой вращения;
- комплексную технико-экономическую оценку эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК.

Критериями эффективности и целесообразности использования инверторных ДГ с теми или иными техническими решениями в составе МЭК являются удельный расход топлива и, в отличие

от существующих подходов, ресурс и суммарная стоимость эксплуатации ДГ. Ограничивающие параметры – выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

Проиллюстрируем методику на примере инверторного ДГ максимальной мощностью 100 кВт с первичным двигателем – 4ЧН15/20.5. Для минимизации негативных последствий снижения частоты вращения ДГ при уменьшении нагрузки было предложено техническое решение, заключающееся в уменьшении степени сжатия при одновременном увеличении давления наддува. Все расчеты выполнялись для четырех вариантов конструкции ДВС:

- 1) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 14,5 (базовый);
- 2) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 13,5;
- 3) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 14,5;
- 4) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 13,5.

Для определения изменения скорости расходования ресурса ДВС в зависимости от режима нагружения была использована ранее разработанная методика А.А. Малоземова и А.С. Шикина [9]. Данная методика была упрощена, поскольку:

- накоплением от воздействия переменной частоты вращения коленчатого вала ДВС (ускорений) и высокочастотными теплосменами и базового, и инверторного ДГ можно пренебречь, так как в автономных системах энергообеспечения изменение нагрузки происходит постепенно;
- базовая энергоустановка работает при постоянной частоте вращения, а в случае инверторного ДГ каждой нагрузке соответствует одна оптимальная частота вращения.

Согласно методике, относительная скорость накопления повреждений от j -го фактора ДВС (по отношению к базовому) [10]

$$K_j = \frac{c_j}{c_j^0}, \quad (1)$$

где символ ' относится к базовому двигателю; C – условная скорость накопления повреждений:

- от инерционных нагрузок

$$C_n = \sum_1^i (n_i^{2m+1} \cdot f_i), \quad (2)$$

где m – показатель степени ($m = 6$ [11]); f_i – частоты возникновения i -го режима; n_i – частота вращения коленчатого вала на i -ом режиме;

– от газовых сил

$$C_{Pz} = \sum_1^i (P_{zi}^m \cdot n_i \cdot f_i); \quad (3)$$

– от воздействия низкочастотных макротеплосмен

$$C_T = \sum_1^i (C_{Ti}^m \cdot f_i \cdot n_i), \quad (4)$$

$$C_{Ti} = \left(\frac{G_{mi}}{G_{mi \text{ nom}}} \right)^a \cdot \left(\frac{n_{\text{nom}}}{n_i} \cdot \left(\frac{P_{k \text{ nom}}}{P_{ki}} \right)^{0.61} \right)^b, \quad (5)$$

где G_m – часовой массовый расход топлива; a и b – показатели степени, зависящие от рассматриваемой поверхности; P_k – давление воздуха перед органами впуска; nom – номинальный режим; P_z – максимальное давление газов в цилиндре.

Условная скорость изнашивания [12]

$$C_{\text{изн}} = \sum_1^i (P_m \cdot f_i \cdot n_i), \quad (6)$$

где P_m – давление механических потерь.

Показатель ресурса ДВС определяется исходя из известного значения ресурса базового двигателя R' :

$$R = R' / K_{\Sigma}, \quad (7)$$

где K_{Σ} – суммарная относительная скорость накопления повреждений исследуемого ДВС (по отношению к базовому).

В выражении (7) используется значение ресурса ДВС, а не ДГ, так как, согласно действующим нормативно-техническим документам, двигатель определяет ресурс энергоустановки.

Для расчета остальных показателей ДВС использовалось программное обеспечение Internal Combustion Engine Research and Development (ICE RnD), разработанное А.А. и Г.А. Малоземовыми. Подробное описание программы и математических моделей приведено в [13]. Функциональные возможности программы идентичны коммерческим AVL Boost/Cruise, Ricardo Wave, GT-Suite, LMS Amesim и т. д.

2. Результаты и обсуждение

Предполагалось, что мощность инверторного ДГ составляет 100 % от установленной мощности МЭК. Максимальная мощность ДВС определялась с учетом КПД электротехнической части ДГ (принят равным 0,95), нормативного коэффициента реактивной нагрузки $\cos \varphi = 0,8$, но без учета возможности 10 %-ной перегрузки. Оптимальный алгоритм управления ДВС, синтезированный с применением методики [14], основан-

ной на поиске минимума функциональной зависимости удельного эффективного расхода топлива инверторного ДГ от нагрузки и частоты вращения первичного ДВС приведен на рис. 2. Из рисунка видно, что в диапазоне нагрузок от 0 до 95–100 кВт целесообразно снижать частоту вращения коленчатого вала ДВС и только при нагрузках, близких к максимальным, частота вращения должна быть номинальной.

С использованием графика характерных суточных электрических нагрузок «типичной» автономной системы энергоснабжения [15] была построена гистограмма частоты возникновения режимов нагружения энергоустановки без учета ВИЭ (предполагаем предельный случай – энергия ВИЭ отсутствует, рис. 3).

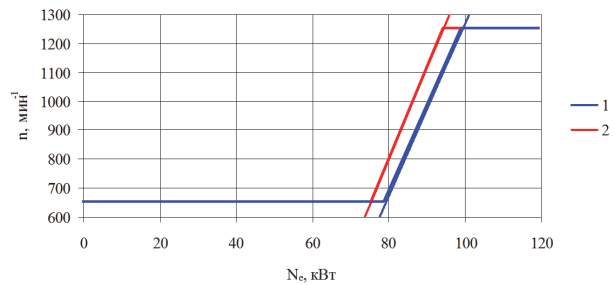


Рис. 2. Алгоритм оптимального регулирования частоты вращения дизеля 4СН15/20.5:

1 – без учета;
2 – с учетом КПД электротехнической части инверторного ДГ
[Figure 2. Algorithm for the diesel engine 4СН15/20.5 speed optimal control:

1 – not taking into account; 2 – taking into account the inverter generator set electrical parts efficiency]

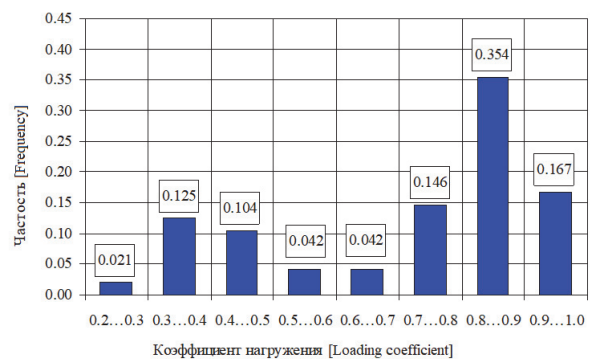


Рис. 3. Частота возникновения режимов нагружения ДГ
[Figure 3. Frequency of generator set loading modes occurrence]

На основании гистограммы частоты и алгоритма оптимального регулирования получены средние частоты вращения коленчатого вала ДВС инверторного ДГ (варианты 3 и 4) в каждом из

диапазонов нагрузки. Для каждого режима определены значения удельного расхода топлива (рис. 4) и рассчитаны интегральные показатели среднесуточных и среднегодовых затрат на дизельное топливо в различных вариантах исполнения (средняя оптовая стоимость в Республике Саха (Якутия) в 2019 году – 55 руб./кг).

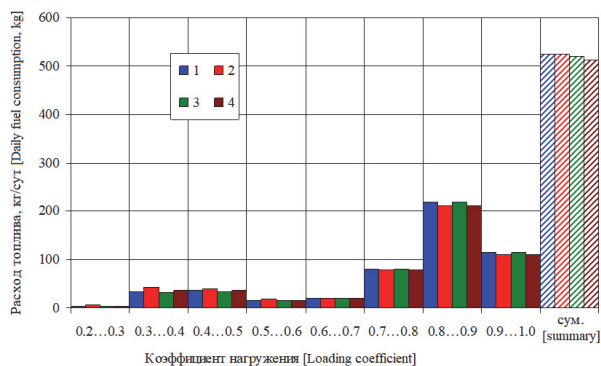


Рис. 4. Среднесуточный расход топлива ДГ в различных вариантах конструктивного исполнения (1–4)
[Figure 4. Average generator set daily fuel consumption in various design options (1–4)]

Годовые затраты на приобретение топлива для базового варианта ДГ составляют 10,5 млн руб. Снижение степени сжатия с 14,5 до 13,5 единиц при постоянной частоте вращения коленчатого вала не влечет какое-либо заметное изменение суточного и годового расходов топлива. Увеличение расхода на режимах малых и средних нагрузок (менее 80 кВт) компенсируется его уменьшением на режимах, близких к номинальным (до момента стабилизации частоты вращения и включения байпаса инвертора).

Затраты на приобретение топлива для инверторного ДГ с оптимальной частотой вращения коленчатого вала и степенью сжатия 14,5 снизятся по сравнению с базовым вариантом на 103 тыс. руб., или 1 %. Так как мы выполняли расчет для предельного случая – отсутствие ВИЭ, в условиях реального МЭЖ эффект будет выше. Например, если генерация ВИЭ будет составлять 50 % от установленной мощности МЭЖ, максимально возможная годовая экономия топлива составит 2,2 %, или 226 тыс. руб.

Снижение степени сжатия до 13,5 при переменной частоте вращения ДГ дополнительно позволяет уменьшить затраты на топливо на 1,5 %. Экономический эффект по сравнению с базовым

вариантом составит 268 тыс. руб., или 2,5 %. Если ВИЭ будет генерировать 50 % мощности от установленной, максимально возможная годовая экономия топлива уменьшится до 1,3 %, или 115 тыс. руб. Обратный эффект влияния мощности ВИЭ по сравнению с базовым вариантом с переменной частотой вращения объясняется тем, что удельный эффективный расход топлива варианта 4 в диапазоне значений коэффициента нагружения 0,3–0,5 выше, чем для варианта 1. Таким образом, снижение степени сжатия при одновременном увеличении давления наддува позволяет снизить затраты на топливо для МЭЖ на 1–2,5 %.

Заявленный ресурс дизеля 4ЧН15/20.5 – 12 000 ч. Средняя стоимость отечественной энергоустановки бескапотного исполнения 1-й степени автоматизации мощностью 100 кВт в 2019 году – 800 тыс. руб., соответственно, скорость расходования ресурса в стоимостном выражении составит 584 тыс. руб./год при непрерывной эксплуатации и 292 тыс. руб./год при работе совместно с ВИЭ мощностью 100 кВт.

С использованием гистограммы (рис. 3) были определены значения суммарной относительной скорости накопления повреждений и относительной скорости изнашивания дизеля 4ЧН15/20.5 в составе ДГ (без учета ВИЭ) с постоянной и переменной частотами вращения коленчатого вала, степенью сжатия 14,5 и 13,5. Основные результаты расчета представлены в табл. 1 и на рис. 5.

При одновременном уменьшении степени сжатия и работе с оптимальной частотой вращения происходит снижение суммарной скорости накопления повреждений на 30 %. Только при снижении степени сжатия либо только при работе с переменной частотой вращения скорость накопления повреждений увеличивается на 9 и 47 % соответственно. Это вызвано тем, что оба мероприятия влекут рост скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза вследствие увеличения амплитуды низкочастотных макротеплосмен из-за: а) изменения частоты вращения; б) увеличения диапазона изменения средних температур и давлений рабочего тела в камере сгорания. В варианте 2 это частично компенсируется снижением газовых нагрузок, а в варианте 3 – уменьшением инерционных нагрузок, что является недостаточным. В варианте 4 одновременно снижаются как инерционные нагрузки, так и газовые силы, что компенсирует рост скорости накопления повреждений из-за макротеплосмен.

Расчет относительной скорости накопления повреждений был выполнен для трех основных деталей: гильзы и головки цилиндра и поршня. В наибольшей степени (на 42 %) уменьшается суммарная скорость накопления повреждений поршня, для головки цилиндра эта ве-

личина составляет 40 %, для гильзы – 30 %. Значит, лимитирующей ресурс деталью является гильза. В случае совместной работы с ВИЭ такой же мощности (100 кВт) в составе МЭК суммарная скорость накопления повреждений снижается на 38 %.

Таблица 1

Относительная скорость накопления повреждений и изнашивания дизеля 4СН15/20.5 в составе энергоустановки
[Table 1. Relative rate of damage accumulation and wear of a 4СН15/20.5 diesel engine as part of a generator set]

Влияющий фактор [Influencing factor]	Вариант [Variant]			
	1	2	3	4
Инерционные нагрузки [Inertial loads]	1,000	1,000	0,607	0,607
Газовые силы [Gas forces]	1,000	0,518	1,171	0,567
Макротеплосмены [Macro heat shifts]:				
– гильза [liner]	1,000	2,095	2,066	2,033
– головка цилиндра [cylinder head]	1,000	1,885	1,770	1,757
– поршень [piston]	1,000	1,822	1,689	1,679
Суммарные повреждающие нагрузки [Total damaging loads]:				
– без ВЭУ [without wind turbine]	1,000	1,086	1,468	0,700
– с ВЭУ [with wind turbine]	1,000	1,853	1,333	0,619
Изнашивание [Wear]	1,000	0,996	0,763	0,759

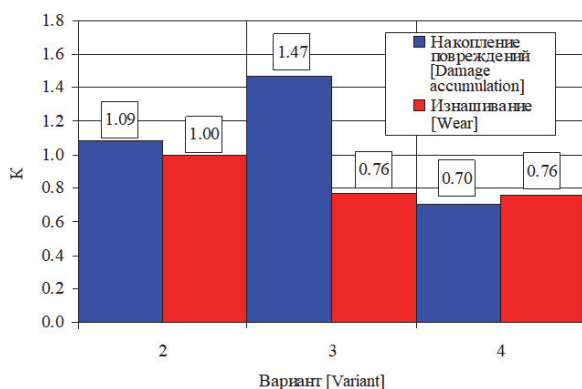


Рис. 5. Суммарная относительная скорость накопления повреждений и относительная скорость изнашивания дизеля 4СН15/20.5 в составе ДГ в различных вариантах конструктивного исполнения (2–4)]
[Figure 5. Total relative rate of damage accumulation and relative wear rate of the 4СН15/20.5 diesel as part of generator set in various design options (2–4)]

Скорость изнашивания уменьшается во всех рассмотренных вариантах из-за снижения частоты вращения и/или уменьшения газовых сил. Для ва-

рианта 4 ее снижение составляет 24 %. То есть параметрический отказ наступит раньше, чем функциональный, поэтому он является лимитирующим при расчете эффективности использования инверторного ДГ. Таким образом, ожидаемое увеличение ресурса дизеля 4СН15/20.5 (с пониженной до 13,5 степенью сжатия) в составе инверторного ДГ составит 32 %.

Снижение степени сжатия позволяет на режиме номинальной мощности уменьшить концентрацию сажевых частиц в момент открытия выпускного клапана примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %. Масса несгоревших углеводородов при снижении степени сжатия с 14,5 до 13,5 единиц близка к нулю, в то же время при степени сжатия 14,5 масса оксидов углерода составляет 30 мг (примерно 8 г/(кВт·ч)), что соответствует действующим нормам (6–10 г/(кВт·ч)). Выбросы вредных веществ, в отличие от показателей назначения – расхода топлива и ресурса, являются показателями безопасности, то есть ограничениями. В данном случае мы убедились, что эти ограничения соблюдены.

Таблица 2

Результаты комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторного ДГ в составе МЭК различного конструктивного исполнения (без учета ВИЭ)
 [Table 2. Results of a comprehensive multi-criteria assessment of the inverter generator set efficiency as part of an multifunctional energy technology complex of various designs (excluding renewable energy sources)]

Экономический показатель, тыс. руб./год [Economic indicator, thousand rubles/year]	Вариант (ε – степень сжатия, n – частота вращения) [Variant (ε – compression ratio, n – engine speed)]			
	1 – базовый [base] ($\varepsilon = 14,5$, $n = \text{const}$)	2 ($\varepsilon = 13,5$, $n = \text{const}$)	3 ($\varepsilon = 14,5$, $n = \text{var}$)	4 ($\varepsilon = 13,5$, $n = \text{var}$)
Затраты на топливо [Fuel costs]	10 531	10 536	10 428	10 263
Изменение (относительно базового варианта) [Change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+5	–103	–268
– относительное [relative], %	–	+0,05	–0,98	–2,54
Расходование ресурса [Resource consumption]	584	634	857	444
Изменение (относительно базового варианта) [Change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+50	+273	–140
– относительное [relative], %	–	+8,56	+46,75	–23,97
Итого [Total]	11 115	11 170	11 285	10 707
Изменение «Итого» (относительно базового варианта) [“Total” change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+55	+170	–408
– относительное [relative], %	–	+0,49	+1,53	+3,67

Необходимо отметить, что для каждого конкретного технического решения может понадобиться проведение дополнительных исследований, выходящих за рамки методики, излагаемой в статье. Например, снижение степени сжатия влечет ухудшение пусковых качеств ДВС, поэтому нужно подтверждение их соответствия требованиям нормативно-технических документов. В табл. 2 представлены основные результаты комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторного ДГ в составе МЭК различного конструктивного исполнения (без учета изменения затрат на текущий ремонт ДВС и других эксплуатационных затрат).

Заключение

В ходе проведенного исследования разработана и апробирована методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функцио-

нирования ДВС с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения

На примере инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт с первичным дизелем 4ЧН15/20.5 с применением разработанной методики:

– выявлено, что работа двигателя с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения и без дополнительных конструктивных мероприятий влечет увеличение скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза и поэтому экономически нецелесообразна, несмотря на снижение расхода топлива на 1 % и более;

– установлено, что снижение степени сжатия при одновременном повышении давления наддува позволяет повысить ресурс двигателя до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 % и до параметрического отказа вследствие изнашивания на 32 %, при этом затраты на эксплуатацию инверторного двигатель-генератора снизятся на 3,7 % относительно базовой (без изменений) энергоустановки. Показатели выбросов сажевых частиц

уменьшатся примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %, углеводов – практически до нуля.

Таким образом, доказана необходимость применения разработанной методики комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК, позволяющей оценить влияние тех или иных конструктивных изменений на суммарную экономическую и техническую эффективность эксплуатации МЭК.

Информация о конфликте интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Участие авторов

И.Я. Редько – автор концепции многофункционального энерготехнологического комплекса. *А.А. Малоземов* – научный руководитель работы. *Г.А. Малоземов* – разработка имитационных моделей и программного обеспечения. *А.В. Наумов* – разработка математических моделей процессов в системах двигателя, проведение расчетов. *Д.В. Козьминых* – разработка математических моделей процессов изнашивания и накопления повреждений.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года / Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 14.12.2020).

2. *Бушуев В.В., Воронай Н.И., Сендеров С.М., Саенко В.В.* О доктрине энергетической безопасности России // Экономика региона. 2012. № 2 (30). С. 40–50. DOI: 10.17059/2012-2-3.

3. *Malozemov A.A., Kukis V.S., Naumov A.V.* Hybrid power system with variable speed diesel engine // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018. Pp. 63–68. <http://dx.doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544335>.

4. *Leuchter J., Bauer P., Kurka O.* Configuration for mobile electrical power source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004). Nuremberg: PCIM Press, 2004. Vol. 1. Pp. 916–919.

5. *Manwell J.F., Stein W.A., Rogers A., McGowan J.G.* An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems // Renewable Energy. 1992. No. 6. Pp. 563–571. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90019-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(92)90019-Y).

6. *Lee J.H., Lee S.H., Sul S.K.* Variable-speed engine generator with supercapacitor: isolated power gene-

ration system and fuel efficiency // IEEE transactions on industry applications. 2009. No. 6. Pp. 2130–2135.

7. *Обухов С.Г., Плотников И.А.* Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. С. 95–102.

8. *Хватов О.С., Самоявцев И.С., Дарьенков А.Б.* Имитационная модель единой судовой электростанции на базе системы «двигатель внутреннего сгорания – генератор» переменной скорости вращения // Вестник ИГЭУ. 2012. № 2. С. 1–5.

9. *Малоземов А.А., Шикин А.С.* Расчетно-экспериментальная оценка влияния уровня дефорсирования на ресурс дизеля типа В-2 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2009. № 24. С. 89–96.

10. *Malozemov A.A., Dooun V.I., Kozminykh D.V.* Theoretical and experimental evaluation of diesel engine derating effect on its life time // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer Nature Switzerland AG, 2020. Pp. 55–63. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_7

11. *Кудряш А.П.* Надежность и рабочий процесс транспортного дизеля. Киев: Наукова думка, 1981. 136 с.

12. *Sreenath A.K., Venkatesh S.* Experimental studies on the wear of engine components // Wear. 1970. No. 16. Pp. 245–254. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90248-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(70)90248-6).

13. *Malozemov A.A., Bondar V.N., Egorov V.V., Malozemov G.A.* Digital twins technology for internal combustion engines development // Global Smart Industry Conference 2018. Chelyabinsk: IEEE Xplore Digital Library, 2018.

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

15. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 3. Производство и распределение электрической энергии / под ред. И.Н. Орлова и др. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Для цитирования

Редько И.Я., Малозёмов А.А., Малозёмов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В. Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 244–253. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes

Ivan Ya. Redko^a, Andrey A. Malozemov^b,
Georgiy A. Malozemov^b, Alexey V. Naumov^b, Dmitry V. Kozminykh^b

^aG.M. Khrzhizhanovsky Power Engineering Institute, 19 Leninskii Ave, Moscow, 119071, Russian Federation

^bSouth Ural State University (National Research University), 76 Lenina Ave, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

Article history:

Received: December 10, 2020

Revised: January 22, 2021

Accepted: January 27, 2021

Keywords:

multifunctional energy technology complex, inverter power plant, internal combustion engine, efficiency, fuel consumption, resource, emissions of harmful substances

Abstract. A method has been developed for a comprehensive multi-criteria assessment of the efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy-technological complexes with technical solutions aimed at reducing the negative consequences of the internal combustion engine operation with an optimal from the point of view of fuel efficiency speed. The method includes: synthesis of the optimal engine speed control algorithm, determination of the complex operating modes under operating conditions, assessment of changes in fuel consumption and harmful substances emissions with exhaust gases and resource consumption rate when the engine is switched to the operating mode with the optimal speed, complex technical and economic assessment of the inverter power plants efficiency. On the example of an inverter power plant with a capacity of 100 kW, the need to apply the method is proved. It was found that the engine operation with the optimal from the point of view of fuel efficiency speed and without additional design measures entails an increase in the damage accumulation rate by 1.7–2.1 times and therefore is economically inexpedient, despite a decrease in fuel consumption by 1% or more. It was found that a decrease in the compression ratio with a simultaneous increase in the boost pressure makes it possible to increase the engine resource up to a functional failure due to damage accumulation by 43% and to a parametric failure due to wear by 32%, while the operating costs of the inverter power plant will decrease by 3.7% relative to the base (no changes) power plants. The emission of soot particles will decrease by about 2 times, nitrogen oxides – by 2%, hydrocarbons – almost to zero.

Conflict of interest information

No conflict of interest.

Contribution of authors

Ivan Ya. Redko – author of the multifunctional energy technological complex concept. *Andrey A. Malozemov* – scientific supervisor of the work. *Georgiy A. Malozemov* – development of simulation models and software. *Alexey V.*

Naumov – development of mathematical models of processes in engine systems, calculations. *Dmitry V. Kozminykh* – development of wear and damage accumulation processes mathematical models.

References

1. Ministry of Energy of the Russian Federation. *Energy Strategy of Russia for the period up to 2035*. (In Russ.) Available from: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 14.12.2020).
2. Bushuev VV, Voropay NI, Senderov SM, Saenko VV. About the energy security doctrine of Russia. *Economy of Region*. 2012;2(30):40–50. <http://dx.doi.org/10.17059/2012-2-3>.
3. Malozemov AA, Kukis VS, Naumov AV. Hybrid power system with variable speed diesel engine. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*.

Ivan Ya. Redko, Deputy General Director of JSC “ENIN”, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041; redko_iya@mail.ru.

Andrey A. Malozemov, Professor of the Wheeled and Tracked Vehicles Department of the SUSU (NRU), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; WOS Research ID: M-5743-2018, Scopus Author ID: 57170613800, eLIBRARY SPIN-code: 6622-7711.

Georgiy A. Malozemov, student of the Mathematics, Mechanics and Computer Technologies Faculty of SUSU (NRU); Scopus Author ID: 57170613800.

Alexey V. Naumov, Head of the Educational Unit, Deputy Head of the Tank Troops Department of the SUSU (NRU).

Dmitry V. Kozminykh, applicant of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles of the SUSU (NRU).

Chelyabinsk; 2018. p. 63–68. <http://dx.doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544335>.

4. Leuchter J, Bauer P, Kurka O. Configuration for mobile electrical power source. *The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004)*. 2004;(1):916–919.

5. Manwell JF, Stein WA, Rogers A, McGowan JG. An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems. *Renewable Energy*. 1992;(6):563–571. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90019-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(92)90019-Y).

6. Lee JH, Lee SH, Sul SK. Variable-speed engine generator with supercapacitor: isolated power generation system and fuel efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;(6):2130–2135.

7. Obukhov SG, Plotnikov IA. Experimental studies of a diesel generator set at variable speed. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015;326:95–102.

8. Khvatov OS, Samoyavchev IS, Darienkov AB. Simulation model of a unified ship power plant based on the system “internal combustion engine – generator” of variable rotation speed. *Vestnik IGAU*. 2012;(2):1–5.

9. Malozemov AA, Shikin AS. Experiment-calculated estimation of derating level influence upon resource of converted B-2 type diesel engine. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2009;(24):89–96.

10. Malozemov AA, Dooun VI, Kozminykh DV. Theoretical and experimental evaluation of diesel engine derating effect on its life time. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. p. 55–63. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_7.

11. Kudryash AP. *Nadezhnost i rabochiy protsess transportnogo dizelya [Reliability and working process of transport diesel engine]*. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1981.

12. Sreenath AK, Venkatesh S. Experimental studies on the wear of engine components. *Wear*. 1970;(16):245–254. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90248-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(70)90248-6).

13. Malozemov AA, Bondar VN, Egorov VV, Malozemov GA. Digital twins technology for internal combustion engines development. *Global Smart Industry Conference 2018*. Chelyabinsk: IEEE Xplore Digital Library; 2018.

14. Aleshkov OA, Malozemov AA. Povysheniye toplivnoy ekonomichnosti mnogofunktsional'nogo energo-tekhnologicheskogo kompleksa optimizatsiyey skorostnogo rezhima pervichnogo dizel'nogo dvigatelya v yego sostave [Improving the fuel efficiency of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode of the primary diesel engine in its composition]. *Polzunovskiy Vestnik*. 2009;(1/2):199–209.

15. Orlov IN, et al. (eds.) *Elektrotekhnicheskiy spravochnik. T. 3. Proizvodstvo i raspredeleniye elektricheskoy energii [Electrotechnical reference book. Vol. 3. Production and distribution of electrical energy]*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1988.

For citation

Redko IYa, Malozemov AA, Malozemov GA, Naumov AV, Kozminykh DV. Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):244–253. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>