

Многофункциональный энерготехнологический комплекс с гибридной энергоустановкой

Рецензия эксперта на статью получена 26.12.2018 [Expert review on the article received December 26, 2018].

Топливная экономичность автономных электро- и теплогенерирующих установок с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания является важным показателем их технического уровня и фактором конкурентоспособности [1]. Одним из способов снижения эксплуатационного расхода топлива является работа первичного двигателя с оптимальной, с точки зрения экономичности, частотой вращения при данном режиме нагружения. Реализация этого технического решения наиболее целесообразна для двигателей, функционирующих в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), включающих гибридную ветроэлектрическую установку, преобразователь частоты (ПЧ), стабилизирующий частоту тока до требуемых стандартами значений, и систему утилизации сбросового тепла двигателя [2]. Снижение частоты вращения влечёт изменение коэффициента полезного действия (КПД) генератора, инвертора и другого электрооборудования. Кроме того, изменяется энергетический баланс двигателя, что влияет на количество тепла, утилизируемого от систем охлаждения, смазки, отвода отработавших газов.

Для определения оптимального скоростного режима двигатель-генератора МЭК были проведены расчётные и экспериментальные исследования, объектами которого являлись дизели типа Ч13/14 и ЧН13/14 (производства Алтайского и Ярославского моторных заводов) для автономных энергоустановок. Предварительные расчётные исследования показали, что основное влияние на повышение топливной экономичности первичного

Для определения оптимального скоростного режима двигатель-генератора МЭК были проведены исследования, объектами которого являлись дизели типа Ч13/14 и ЧН13/14 производства ОАО «АМЗ» и ОАО «ЯМЗ» для автономных энергоустановок

двигателя энергоустановки при снижении частоты вращения оказывает уменьшение механических и насосных потерь. При этом максимум КПД смещается в сторону более низкой частоты вращения. Расчётная потенциальная экономия топлива при работе первичного двигателя энергоустановки при переменной частоте вращения может достигать 11–15 % при нагрузках менее 25 % от номинальной [3].

Работа первичного двигателя на переменном скоростном режиме эффективна, с точки зрения топливной экономичности, только в диапазоне от нулевой до определённой нагрузки (например, 12 кВт на цилиндр для безнаддувного двигателя типа Ч13/14 и 14 кВт на цилиндр для двигателя типа ЧН13/14 с наддувом). Количество потенциально утилизируемого тепла двигателя в составе энергоустановки с переменной частотой вращения в общем случае меньше, 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 двигателя приведена на рис. 1. При относительной частоте вращения 0,87 р/м механические потери всережимного генератора равны

УДК 621.311.236. Научная специальность: 05.04.02.

Многофункциональный энерготехнологический комплекс с гибридной энергоустановкой

Иван Я. Редько, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора, ОАО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского»; **Андрей А. Малозёмов**, д.т.н., доцент, профессор кафедры колёсных и гусеничных машин; **Владимир С. Кукис**, д.т.н., профессор, ведущий эксперт кафедры колёсных и гусеничных машин; **Алексей В. Наумов**, начальник учебной части, заместитель начальника кафедры «Танковые войска», Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет, ЮУрГУ); **Дария А. Новикова**, старший преподаватель кафедры «Информационные, математические и естественно-научные дисциплины», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики» (ЮИУиЭ)

Теоретически и экспериментально обоснована возможность снижения расхода топлива первичного поршневого двигателя в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией его скоростного режима. Предложена методика оптимизации, основанная на минимизации зависимости удельного эффективного расхода топлива от нагрузки и частоты вращения двигателя, обоснован алгоритм функционирования системы её автоматического регулирования.

Ключевые слова: энергоэффективность, расход топлива, многофункциональный энерготехнологический комплекс, гибридная энергоустановка, электроснабжение, теплоснабжение, поршневой двигатель, регулятор частоты вращения.

UDC 621.311.236. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Multifunctional energy technology complex with a hybrid power plant

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, deputy general director of the "Energy Institute named after G.M. Krzhizhanovskiy", OJSC; **Andrey A. Malozemov**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles; **Vladimir S. Kukis**, Doctor of Technical Sciences, Professor, leading expert of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles; **Alexey V. Naumov**, head of Education Department — deputy head of the "Tank forces" Department, South-Ural State University (National Research University, Chelyabinsk city); **Daria A. Novikova**, senior lecturer of the "Information, mathematical and natural sciences" Department, Educational institution of higher education "South Ural Institute of Management and Economics" (Chelyabinsk city)

Theoretically and experimentally justified the possibility of fuel consumption reducing of a primary reciprocating engine as part of a multifunctional energy complex by optimizing its speed. The optimization method, based on minimizing dependence of the specific effective fuel consumption on an engine load and speed, is proposed, the algorithm of an engine automatic speed control system functioning is justified.

Key words: energy efficiency, fuel consumption, multifunctional energy complex, hybrid power set, electricity supply, heat supply, reciprocating engine, speed regulator.

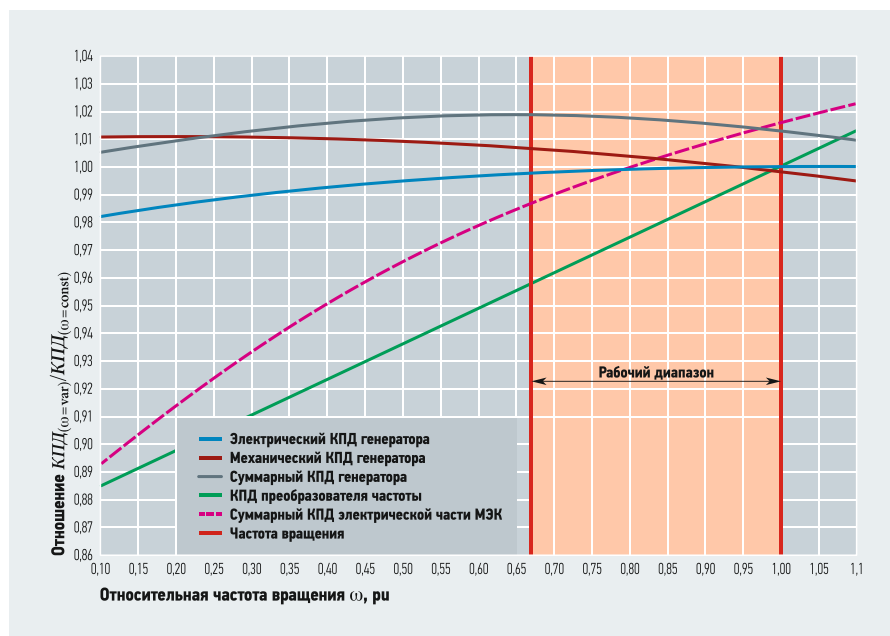


Рис. 1. Зависимость относительного изменения КПД электрической части многофункционального энерготехнологического комплекса от частоты вращения первичного двигателя



Рис. 2. Полевые испытания многофункционального энерготехнологического комплекса на базе ветроэлектростанции «Заполярная» (город Воркута) и всережимного двигатель-генератора

Для дизеля 6Ч13/14 величина среднего квадратичного отклонения расчётных и эмпирических значений удельного эффективного расхода топлива, при работе по нагрузочной характеристике, составила 0,99, для 4ЧН13/14 — 0,98

потерям в обычном генераторе. При снижении частоты вращения до 0,67 pu 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 номинальной нагрузке и частоте вращения) до 0,952 (при коэффициенте нагружения 0,2 и $\omega = 0,67$ pu). По отношению к генератору ПЧ представляет собой активную нагрузку, что позволяет дополнительно снизить потери в генераторе на 1,0–1,5 %.

Экспериментальная часть исследования выполнялась в три этапа. На первом этапе были проведены стендовые испытания двигателей 4ЧН13/14 (Д-442) и 6Ч13/14 (А-01). На втором этапе в условиях стенда была испытана энергоустановка номинальной мощностью 200 кВт на базе двигателя 8ЧН13/14 (ЯМЗ-7514) укомплектованная всережимным генератором и преобразователем частоты. В ходе третьего этапа были проведены полевые испытания МЭК с двигатель-генератором на базе дизеля 8ЧН13/14 в составе ветроэлектростанции «Заполярная» (город Воркута). Двигатель-генератор с преобразователем частоты и системой управления был смонтирован на шасси автомобиля «КамАЗ» (рис. 2).

Сравнение результатов расчётного и экспериментального исследования показало, что для дизеля 6Ч13/14 величина среднего квадратичного отклонения расчётных и эмпирических значений удельного эффективного расхода топлива, при работе по нагрузочной характеристике, составила 0,99, для 4ЧН13/14 — 0,98.

Статистическая обработка данных показывает, что удельный расход топлива энергоустановкой на базе двигателя 8ЧН13/14, приведённый к её электрической мощности, может быть выражен с помощью квадратичной регрессионной зависимости:

$$g_3 = 414,4 - 0,9078N_3 - 0,2259n + 0,0114N_3^2 + 0,0016529N_3n + 0,0001721n^2, \quad (1)$$

где N_3 — электрическая мощность энергоустановки; n — частота вращения коленчатого вала первичного двигателя.

Дифференцируя уравнение (1) по частоте вращения и приравнявая полученное выражение к нулю, получим:

$$\frac{dg_a}{dn} = -0,2259 + 0,0016529 N_3 n + 2 \times 0,0001721 n = 0. \quad (2)$$

Откуда оптимальная, с точки зрения минимизации удельного расхода топлива, зависимость частоты вращения коленчатого вала первичного двигателя от электрической нагрузки энергоустановки:

$$n = 4,801 N_3 + 656. \quad (3)$$

Аналогичным образом можно получить оптимальную зависимость для энергоустановки на базе безнаддувного двигателя типа Ч13/14. Оптимальные характеристики систем автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения двигатель-генераторов и отдельных двигателей приведены на рис. 3. Для удобства сравнения на рисунке показана характеристика двигатель-генератора на базе дизеля 4ЧН13/14, полученная уменьшением в два раза мощности энергоустановки на базе дизеля 8ЧН13/14.

Как видно из рис. 3, линия, соответствующая оптимальной характеристике САРЧ отдельно взятого первичного двигателя, ниже, чем линия, соответствующая оптимальной характеристике САРЧ энергетической установки.

Относительное смещение характеристик равно КПД электротехнической части энергоустановки (всерезимного генератора и преобразователя частоты):

$$\frac{N_3}{N_e} = \eta_{эл.МЭК(n=var)} \approx 0,948, \quad (4)$$

где N_e — эффективная мощность первичного двигателя.

С точки зрения обеспечения работоспособности двигателя и всережимного генератора минимальная частота вращения должна быть ограничена величиной

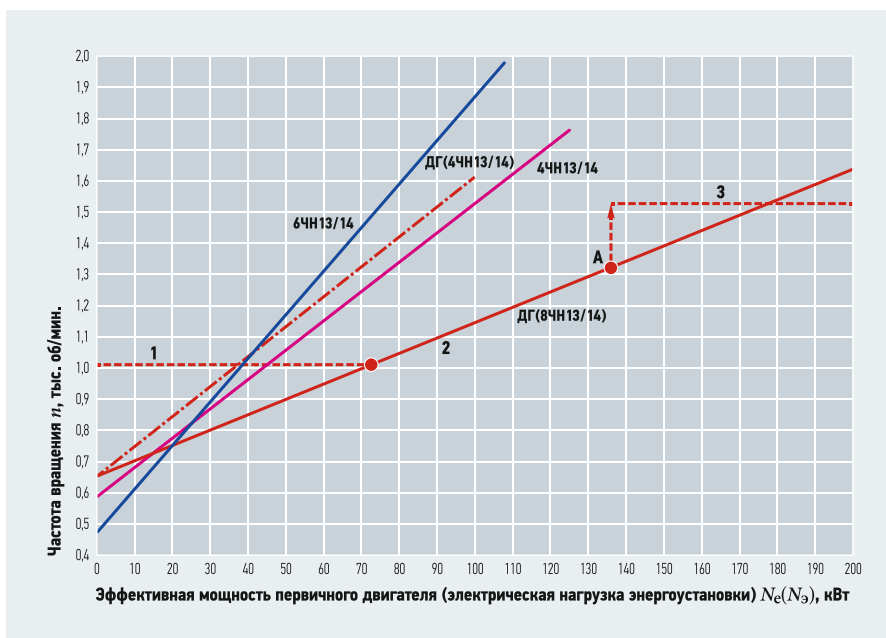


Рис. 3. Оптимальная характеристика системы автоматического регулирования частоты вращения двигателей 4ЧН13/14 и 6ЧН13/14 и двигатель-генераторов на базе 8ЧН13/14 и 4ЧН13/14

1000 об/мин. (для других моделей двигателей и генераторов возможны иные значения) — участок 1 на рис. 3. Максимальную частоту вращения целесообразно ограничить величиной 1300 об/мин. (точка А на рис. 3), так как при большей частоте увеличивается удельный расход топлива. Положение точки А определяется потерями в электрооборудовании установки — если они превышают экономию топлива, полученную в результате снижения частоты вращения первичного дизеля, то двигатель должен быть переведён на номинальную частоту вращения, а преобразователь отключён. Это решение также способствует повышению ресурса преобразователя частоты. В итоге алгоритм САРЧ должен соответствовать ломаной линии 1–2–3 рис. 3.

Потенциальная экономия топлива при работе МЭК на базе дизеля 8ЧН13/14 с всережимным генератором и преобразователем частоты по оптимальной характеристике показана на рис. 4.

Испытания МЭК в составе ветроэлектростанции «Заполярная» 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;

С точки зрения обеспечения работоспособности двигателя и всережимного генератора минимальная частота вращения должна быть ограничена величиной 1000 об/мин. (для других моделей возможны иные значения). Максимальную частоту вращения целесообразно ограничить 1300 об/мин.

- показатели качества электроэнергии на нагрузке (выход источника бесперебойного питания) без отклонений от требований нормативно-технической документации на всех режимах, включая аварийное отключение двигатель-генератора;
- функционирование МЭК при совместной работе с ветроэлектрической установкой и двигатель-генератором устойчивое, деление нагрузок при максимальном использовании мощности ветроэлектрической установки — автоматическое, показатели качества электроэнергии без отклонений на нагрузках в диапазоне 0–150 кВт;
- подтверждена правильность технических решений и адаптивность МЭК при оптимизации энергопотребления от ветроэлектрической установки и двигатель-генератора.



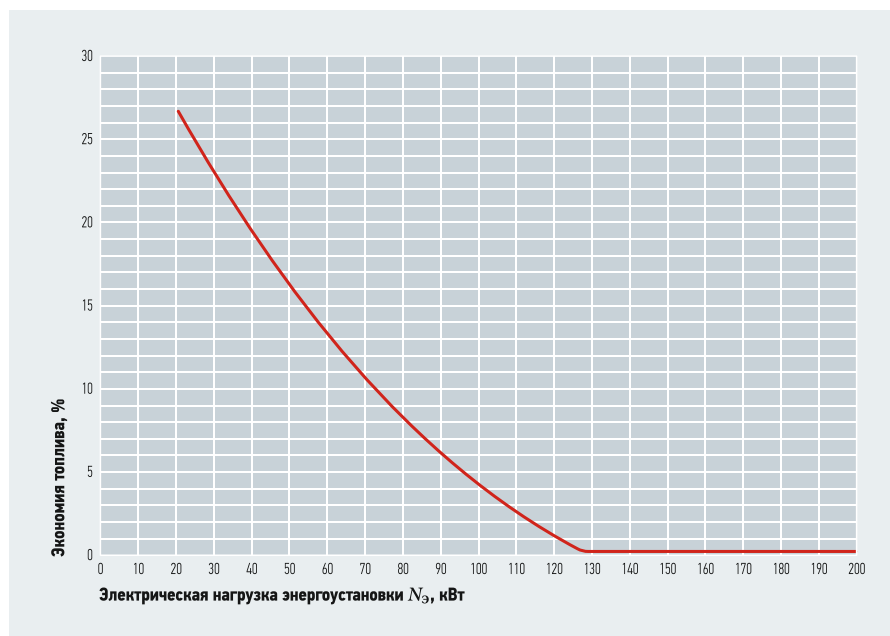


Рис. 4. Потенциальная экономия топлива при работе МЭК со всережимным генератором и преобразователем частоты на базе дизеля 8ЧН13/14 по оптимальной характеристике

Для оценки экономической эффективности технических решений была использована методика, основанная на режимах нагружения имеющих место в реальных условиях эксплуатации.

Расчёт для многофункционального энерготехнологического комплекса на базе дизеля 8ЧН13/14 показал, что преобразователь частоты мощностью 200 кВт окупится за четыре года, что ниже нормативного срока окупаемости капиталовложений (семь лет) и нормативного срока эксплуатации преобразователя (десять лет.) Можно ожидать, что действительный ресурс преобразователя частоты составит не менее 30 лет, так как он будет задействован только семь часов в сутки.

Годовой недоотпуск тепла составит 26 МВт, что в денежном выражении эквивалентно 2,2% от экономии топлива за счёт перевода энергоустановки на режим работы с переменной частотой вращения.

Столь малым значением можно пренебречь, особенно с учётом того, что выработка тепла для энергоустановки не является основной функцией.

Таким образом, в результате исследования установлено, что повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса может быть достигнуто оптимизацией

Оптимальный, с точки зрения топливной экономичности, 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

скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе. Снижение частоты вращения первичного дизеля при малых нагрузках (до 10%) может дать экономию топлива до 27%, что подтверждено результатами испытаний энергоустановки на базе дизеля 8ЧН13/14. В реальных условиях эксплуатации экономия будет ниже и для многофункциональных энерготехнологических комплексов на базе дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 составит около 5%.

Оптимальный, с точки зрения топливной экономичности, 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 двигатель-генератора, полученные экспериментальным или расчётным путём.

При оптимизации должны учитываться характеристики электрооборудования, так как оптимальные алгоритмы для первичного двигателя и электроагрегата на его базе не совпадают.

Минимальная частота вращения 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, рассчитываемой энергоустановкой, не должен превышать расход базовой установки с постоянной частотой вращения. Для дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 диапазон варьирования частот вращений составляет 67–87% от номинальной.

Результаты исследования были использованы АО «Научно-исследовательский институт энергетических систем» и московским Научно-производственным центром «Малой энергетики» при разработке многофункционального энерготехнологического комплекса на базе ветровой электростанции. ●

1. Ильковский К.К., Редько И.Я., Малозёмов А.А. Дизельные электроагрегаты — база малой энергетики // Малая энергетика, 2004. №1. С. 15–24.
2. Алешков О.А., Малозёмов 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.
3. Малозёмов А.А. Теоретические основы оптимизации режимов функционирования двигатель-генераторных установок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Академии военных наук, 2010. №1. С. 100–109.

References — see page 94.



Multifunctional energy technology complex with a hybrid power plant. Pp. 90–93.

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, deputy general director of the "Energy Institute named after G.M. Krzhizhanovskiy", OJSC; **Andrey A. Malozemov**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles; **Vladimir S. Kukis**, Doctor of Technical Sciences, Professor, leading expert of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles; **Alexey V. Naumov**, head of Education Department — deputy head of the "Tank forces" Department, South-Ural State University (National Research University); **Daria A. Novikova**, senior lecturer of the "Information, mathematical and natural sciences" Department, Educational institution of higher education "South Ural Institute of Management and Economics"

1. Il'kovskij K.K., Red'ko I.Ja., Malozemov A.A. *Dizel'nye jelektrouagregaty — baza maloj jenergetiki* [Diesel electrical units — the base of small energy]. *Malaja jenergetika* ["Small energy" Magazine]. 2004. No. 1. Pp. 15–24.
2. Aleshkov O.A., Malozemov A.A. *Povyshenie toplivnoj jekonomichnosti mnogofunkcional'nogo jenergotekhnologicheskogo kompleksa optimizaciej skorostnogo rezhima pervichnogo dizel'nogo dvigatelja v ego sostave* [Increasing the fuel efficiency of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed of a primary diesel engine in its composition]. *Polzunovskij vestnik* ["Polzunovsky bulletin" Magazine]. 2009. No. 1–2. Pp. 199–209.
3. Malozemov A.A. *Teoreticheskie osnovy optimizacii rezhimov funkcionirovanija dvigatel'-generatornyh ustanovok v sostave mnogofunkcional'nyh jenergotekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical bases of optimization of operating modes of engine-generator sets as part of multifunctional power technology complexes]. *Vestnik Akademii voennykh nauk* [Bulletin of the Academy of Military Sciences]. 2010. No. 1. Pp. 100–109.