

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ИНЖЕКТОРАМИ

С.П. Кулманаков, М.Э. Брякотин, С.С. Кулманаков

В данной статье рассмотрена возможность повышения энергоэффективности газопоршневых двигателей на частичных режимах за счет отключения части цилиндров и изменения коэффициента избытка воздуха. Данная возможность достигается благодаря оснащению двигателя индивидуальными газовыми форсунками с электронным управлением. Описана теоретическая возможность достижения поставленной задачи. Приведены результаты расчёта мощности и расхода топлива при отключённых цилиндрах на режимах частичной мощности. В качестве объекта исследования выступает газопоршневой V-образный двигатель 1Г12 производства ОАО ХК «Барнаултрансмаш».

Ключевые слова: двигатель, газопоршневой двигатель, алгоритм управления, индивидуальные инжекторы.

Введение

Повышение требований к топливной экономичности привлекло большое внимание к регулированию мощности комбинированным способом: изменением количества или качества подаваемой горючей смеси и действительного рабочего объема двигателя. Наибольший эффект по топливной экономичности может быть достигнут в двигателях с разъемным коленчатым валом или в двигателях, состоящих из нескольких секций.

Двигатели такого рода не находят широкого применения из-за значительного усложнения конструкции и трудностей, связанных с их работой на переходных режимах.

Чаще всего реализуют схемы с отключением цилиндров, кривошипно-шатунный механизм которых не требует больших конструктивных изменений, а изменениям подвергаются лишь системы питания и газообмена.

Среди большого числа конструктивных решений, известных по патентной литературе и экспериментальным работам, можно выделить две наиболее простых в реализации схемы отключения цилиндров.

Двигатели с впрыскиванием топлива и отключением его подачи. Прекращение впрыскивания топлива может производиться для одного или нескольких цилиндров с соответствующим увеличением подачи топливоздушного заряда в другие работающие цилиндры. В цилиндры с отключенной подачей топлива воздух может поступать через основную впускную систему. При этом способе не требуется серьезных конструктивных изменений, так как вводится только новая программа

в систему питания, но он является менее эффективным, чем отключение привода клапанов.

Во второй схеме отключения цилиндров предусмотрено устройство, перекрывающее впускной трубопровод и соединяющее впускные каналы с выпускной системой работающих цилиндров. В двигателях с регулируемой цикловой подачей топливо может впрыскиваться во все цилиндры, но с пропуском заданного числа циклов при соответствующем увеличении цикловой подачи топлива по определенной программе электронной системы. При этом во всех цилиндрах сохраняется постоянный тепловой режим, что облегчает последующий переход двигателя на полную нагрузку, обеспечиваются одинаковые условия работы в отношении изнашивания цилиндропоршневой группы.

Уменьшение удельного расхода топлива при отключении части цилиндров обусловлено увеличением индикаторного и механического к.п.д. двигателя, что приводит к экономии 10-30%.

В качестве реализации отключения цилиндров был выбран первый вариант, который требует внесения изменений только в алгоритм управления электронного блока.

1. Теоретическая часть

Цель математического моделирования рабочего процесса газопоршневого двигателя заключается в прогнозировании соотношения механической и тепловой энергии на режимах полной и частичной нагрузки.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ИНЖЕКТОРАМИ

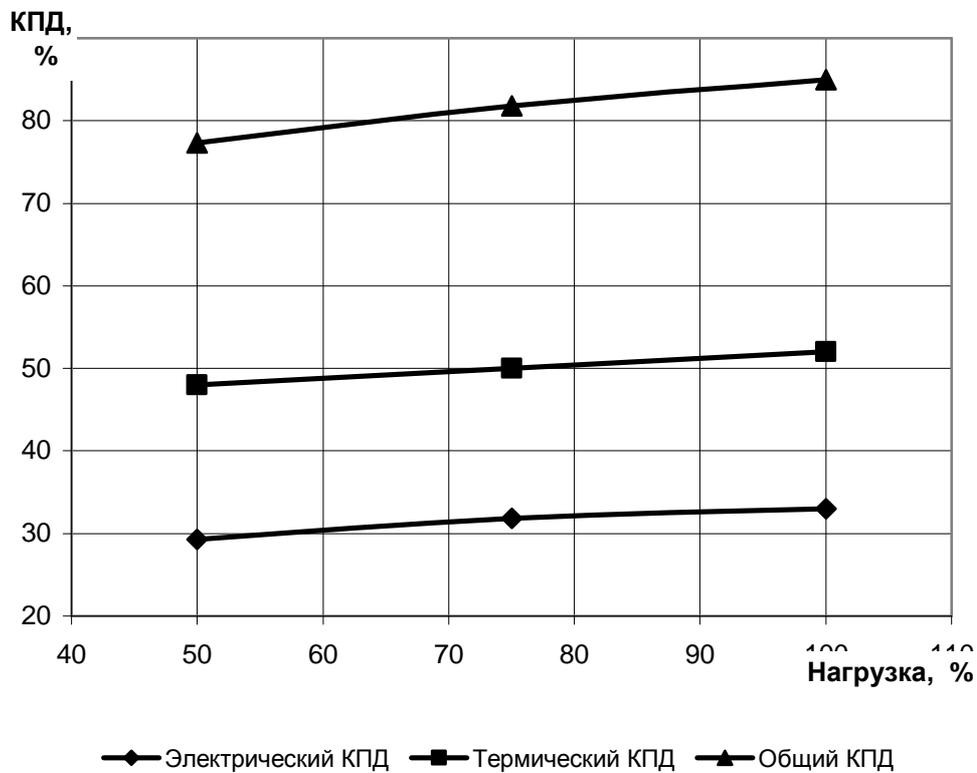
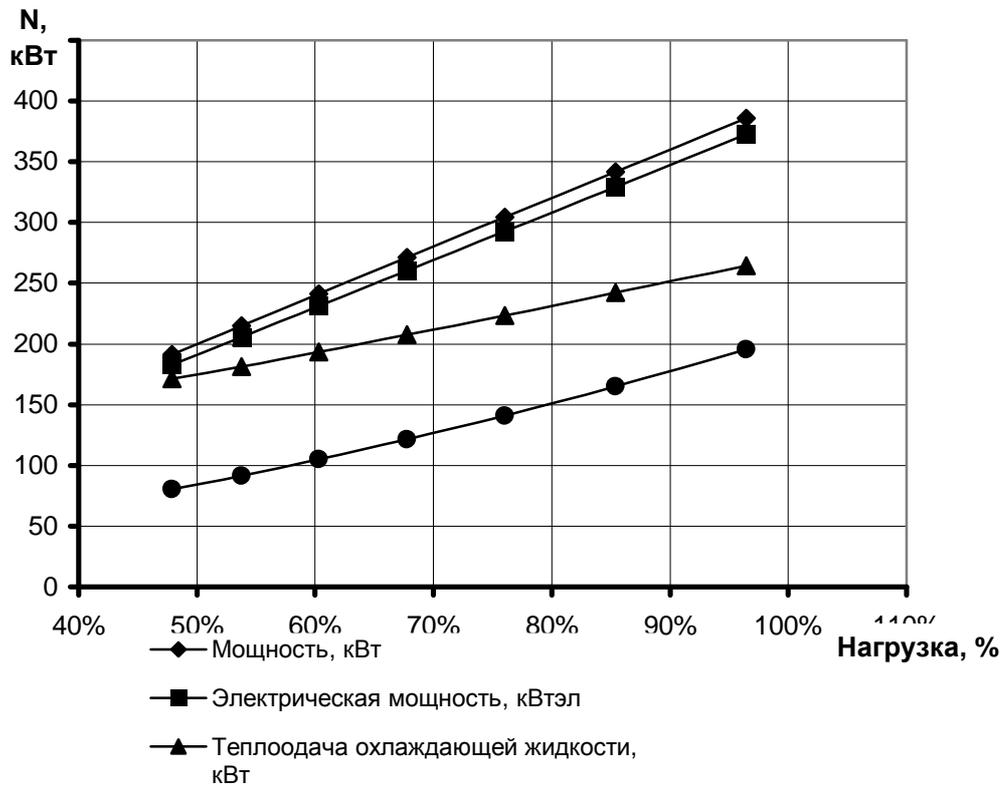


Рисунок 1 - Энергобаланс исследуемого двигателя

Распределение тепла, которое выделяется при сгорании газообразного топлива в цилиндре двигателя, на отдельные составляющие и количественные значения этих составляющих отражает тепловой баланс двигателя. Тепловой баланс составляют на основании уравнения теплового баланса в общем виде

$$Q_o = Q_e + Q_g + Q_m + Q_z + Q_{ост}$$

Здесь Q_o – суммарное количество тепла, подведенное к двигателю с топливом; Q_e – теплота, эквивалентная эффективной работе за 1с; Q_g – количество тепла уходящее в систему охлаждения; Q_m – количество тепла уходящее в систему смазки; Q_z – теплота, унесенная с выпускными газами; $Q_{ост}$ – остаточные (неучтенные) теплотери.

Суммарное количество тепла, подведенное к двигателю с газообразным топливом определялось по формуле, Дж/с:

$$Q_o = H_u \cdot G_m / 3,6$$

где: G_m – часовой массовый расход газа; $H_u = 47,3$ МДж/кг – низшая теплотворная способность газа по паспорту на партию природного газа. Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с, Дж/с:

$$Q_e = 1000 \cdot N_e$$

где N_e – эффективная мощность, кВт;

Теплота, передаваемая системе охлаждения и системе смазки, Дж/с:

$$Q_g = G_g \cdot c_p^g \cdot (t_{вых} - t_{вх}),$$

$$Q_m = G_m \cdot c_p^m \cdot (t_{вых}^m - t_{вх}^m)$$

Здесь G_g, G_m – расход охлаждающей жидкости и смазочного масла, кг/с; c_p^g, c_p^m – теплоемкость охлаждающей жидкости и смазочного масла, Дж/кг К; а величина

$$\Delta t_g = (t_{вых} - t_{вх}), \quad \Delta t_m = (t_{вых}^m - t_{вх}^m)$$

есть разность температур охлаждающей жидкости на входе и выходе двигателя, °С.

Теплоотвод с выпускными газами рассчитывался по формуле, Дж/с:

$$Q_z = c_p^z \cdot (T_z - T_k) \cdot (G_z - G_m)$$

где G_z – массовый расход выпускных газов, кг/с; T_z – температура выпускных газов, К; T_k – температура наддувочного воздуха, К; c_p^z – теплоемкость выпускных газов, Дж/кг К.

Теплоемкость выпускных газов, состоящих из продуктов сгорания газа, аппроксимировалась выражением [3], учитывающим со-

став топливо-воздушной смеси и температуру отработавших газов

$$c_p^z = -0,118 \cdot T_z \cdot a + 1,422 \cdot T_z - 1,181 \cdot 10^{-4} \cdot a + 0,001$$

при этом неучтенные потери теплоты составляют, Дж/с:

$$Q_{ост} = Q_o - (Q_e + Q_g + Q_z + Q_m)$$

Результаты моделирования и натурные испытания газового двигателя показали, что оптимальный угол опережения зажигания равен 30° пкв до ВМТ (рисунок 2).

Номинальная электрическая мощность $N_э$ определяется на клеммах генератора:

$$N_э = \eta_z \cdot N_e$$

где η – коэффициент полезного действия генератора. Величина коэффициента полезного действия генератора по нагрузке изменяется от 0,97 на 100 % до 0,94 на нагрузках меньше 50 %.

В случае утилизации тепла для получения пара и горячей воды вводится понятие тепловая мощность. При получении пара утилизируется теплота выпускных газов. Тепловая мощность необходимая для получения пара определяется по выражению, кВт:

$$P_{Tпар} = \frac{G_n \cdot \Delta i \cdot 1000}{3600}$$

где G_n – расход пара, т/ч; Δi – разность энтальпий пара и питательной среды, кДж/кг.

Получение горячей воды связано с утилизацией теплоты отведенной от системы охлаждения. Тепловая мощность необходимая для получения горячей воды определяется по выражению, кВт:

$$P_{Tгор} = \frac{G_w \cdot c_w \cdot \Delta t_w}{3600}$$

где G_w – расход горячей воды, кг/ч; C_w – теплоемкость воды; Δt_w – перепад температуры в контуре горячего водоснабжения, °С.

Тепловые мощности по пару и воде могут быть рассмотрены порознь и как суммарная тепловая мощность установки, кВт:

$$P_T = P_{Tпар} + P_{Tгор}$$

Коэффициент полезного действия и удельный расход газа газопоршневого электроагрегата определяют по электрической мощности и часовому расходу газа G_T , который является единственным источником энергии в генерирующей установке:

$$h_э = \frac{3600 \cdot N_э}{G_T \cdot H_u}, \quad g_э = \frac{3600}{h_э \cdot H_u} = \frac{G_T}{N_э}$$

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ИНЖЕКТОРАМИ

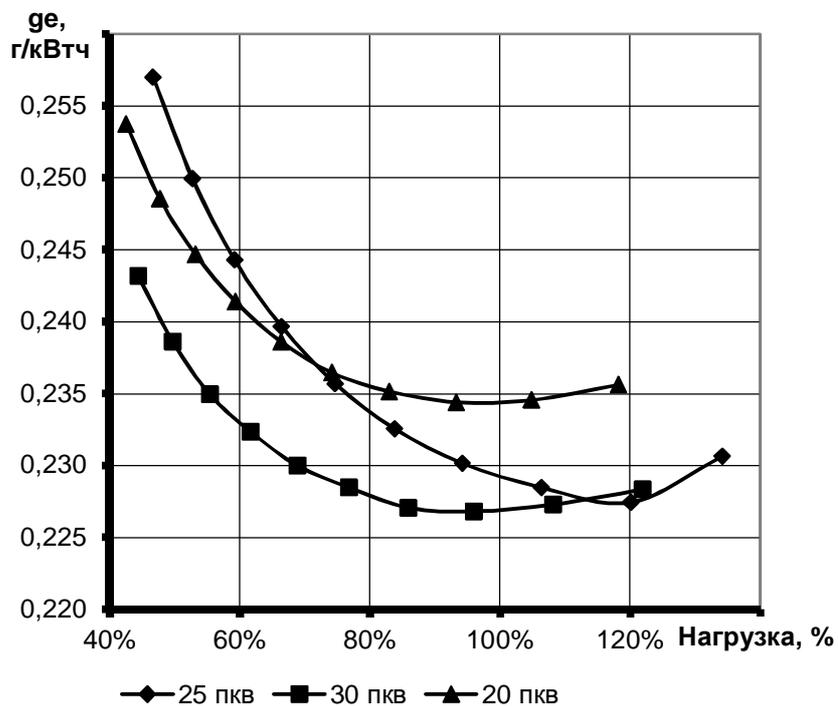


Рисунок 2 - Изменение удельного эффективного расхода газообразного топлива от нагрузки при углах опережения зажигания $Q=20^\circ$ пкв; $Q=25^\circ$ пкв; $Q=30^\circ$ пкв

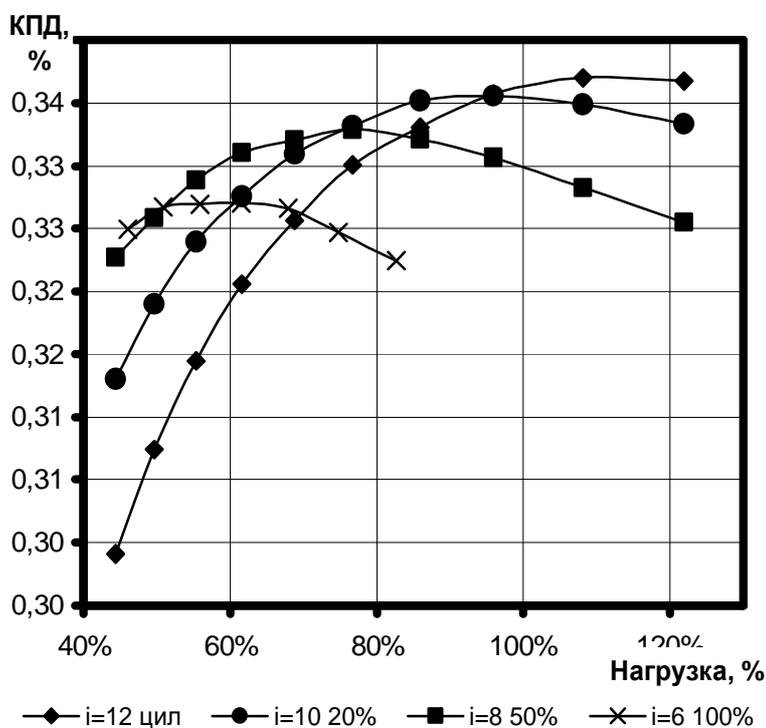


Рисунок 3 – Изменение эффективного КПД от нагрузки при отключении части цилиндров.

По тепловой мощности термический коэффициент полезного действия и удельный расход газа, соответственно равны:

$$h_T = \frac{3600 \cdot P_T}{G_T \cdot H_u},$$

$$g_T = \frac{3600}{h_T \cdot H_u} = \frac{G_T}{P_T}.$$

Общий КПД есть сумма КПД по электрической мощности и термического КПД.

Итогом проведенного расчета служат графики, представленные на рисунке 1. Определение необходимого увеличения цикловой подачи топлива при отключении части цилиндров производится в предположении постоянства мощности и среднего давления трения механических потерь:

$$N_e = 1,577 \cdot \frac{q_u \cdot n \cdot i}{t} h_e = const,$$

откуда следует, что при $i = var$

$$q_u = \frac{N_e \cdot t}{1,577 \cdot n \cdot i \cdot h_e}.$$

При отключении двух цилиндров цикловую порцию следует поднять на 20 %. При отключении четырех цилиндров цикловую порцию следует увеличить на 50%. При отключении шести цилиндров (т.е. половины цилиндров) цикловая порция должна быть увеличена на 100 %. Все увеличение идет от цикловой порции топлива при работе всех цилиндров на соответствующем нагрузочном режиме.

2 Математическое прогнозирование

Отключение двух цилиндров производится ступенчато при достижении нагрузки 90 % и ниже. Отключение четырех цилиндров осуществляется при достижении 75 % нагрузки и ниже. Отключения шести цилиндров обеспечит работу установки на 50 % нагрузки и менее. Ступенчатое изменение цикловой подачи топлива соответствует большинству характеристик потребителя.

Графики изменения эффективного КПД и удельного эффективного расхода топлива (рисунки 3 и 4) при отключении цилиндров на частичных нагрузках 90 %, 75 %, 50 % показывают, что эффективность использования топлива возрастает по сравнению со всеми работающими цилиндрами и по сравнению с каждым последующим отключением по два цилиндра. При этом КПД двигателя будет образовываться верхней огибающей максимальных значений КПД (рисунк 3) и пределы изменения будут составлять от 32,5 до 33,7 % в диапазоне от 40 до 110% нагрузки. Максимальный рост экономичности составляет 7

% на 50 % нагрузке при отключении четырех и шести цилиндров из двенадцати. Отключать более четырех цилиндров как видно из графиков нет необходимости. На 75 % нагрузки отключение четырех цилиндров дает такой же эффект, как и отключение двух цилиндров – 2 % роста экономичности. Отключение двух цилиндров при нагрузке 90% и менее позволяет повысить экономичность в пределах 1 %.

Нецелесообразность отключения более четырех цилиндров иллюстрируют следующие графики изменения удельного эффективного расхода топлива от коэффициента избытка воздуха и изменения коэффициента избытка воздуха от нагрузки (рисунки 5–7).

Отключение более четырех цилиндров при одновременном увеличении цикловой подачи газа на 100 % сильно обогащает газозоудушную смесь в область верхнего концентрационного воспламенения смеси $\alpha=0,65$. Нижний концентрационный предел природного газа составляет $\alpha=2,00$.

Отключение цилиндров позволяет работать газовому двигателю на долевых режимах с коэффициентом избытка воздуха около 0,9. Такой состав смеси позволяет работать с максимальной отдачей мощности при минимальных выбросах окислов азота, но максимальных выбросах окиси углерода, который возможно утилизировать дожиганием. Отключение цилиндров позволяет поддерживать уровень максимального давления сгорания постоянным, сохраняя механическую нагруженность деталей ЦПГ на постоянном уровне.

Режим работы мини-ТЭЦ, с точки зрения состояния органов управления двигателем, характеризуется значением (величиной) подачи газа, углом открытия дроссельной заслонки и угла опережения зажигания.

Переход на электронное регулирование цикловой подачи газа позволяет осуществить качественное и количественное регулирование мощности генерирующей установки. Сочетание двух этих способов регулирования мощности обеспечивает гибкое приспособление электрической и тепловой мощности нуждам потребителя и повышение эффективности.

Качественное регулирование происходит при полностью открытой дроссельной заслонке изменением продолжительности открытия дозирующего клапана электромагнитной форсунки. Изменение цикловой подачи газа происходит скачкообразно при отключении цилиндров - в сторону увеличения.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ИНЖЕКТОРАМИ

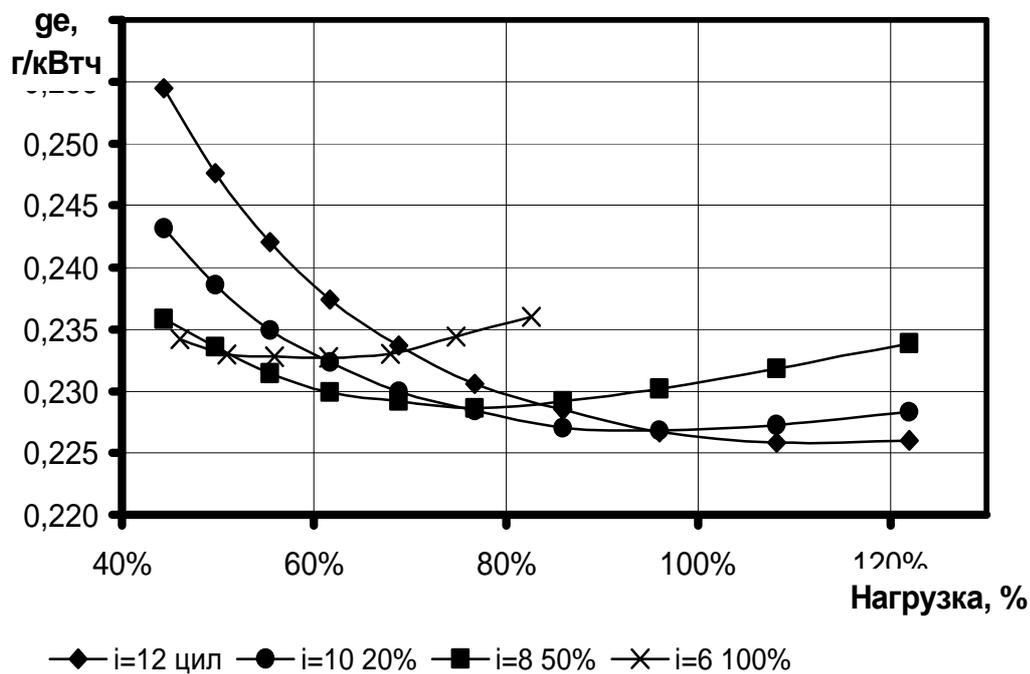


Рисунок 4 – Изменение удельного эффективного расхода топлива от нагрузки при отключении части цилиндров

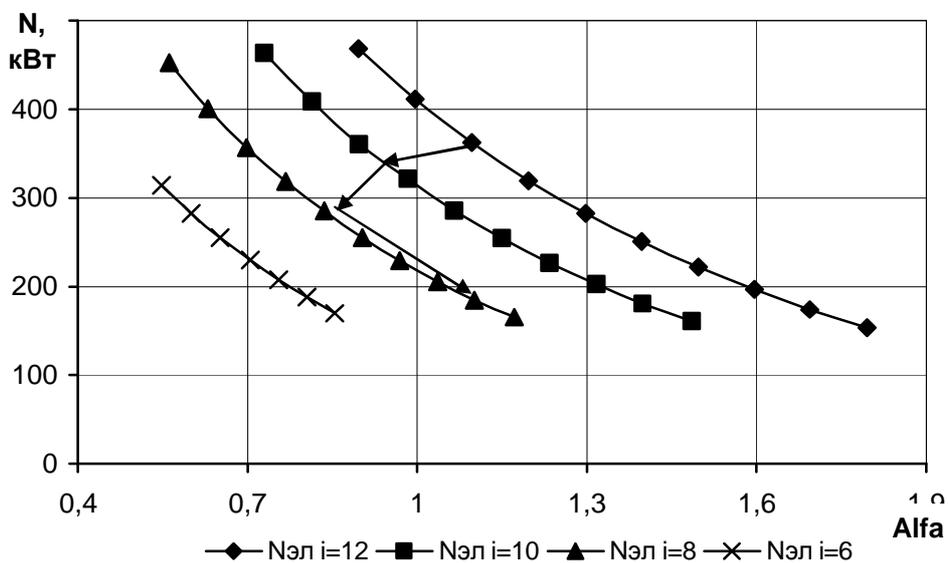


Рисунок 5 – Изменение электрической мощности от коэффициента избытка воздуха при отключении части цилиндров

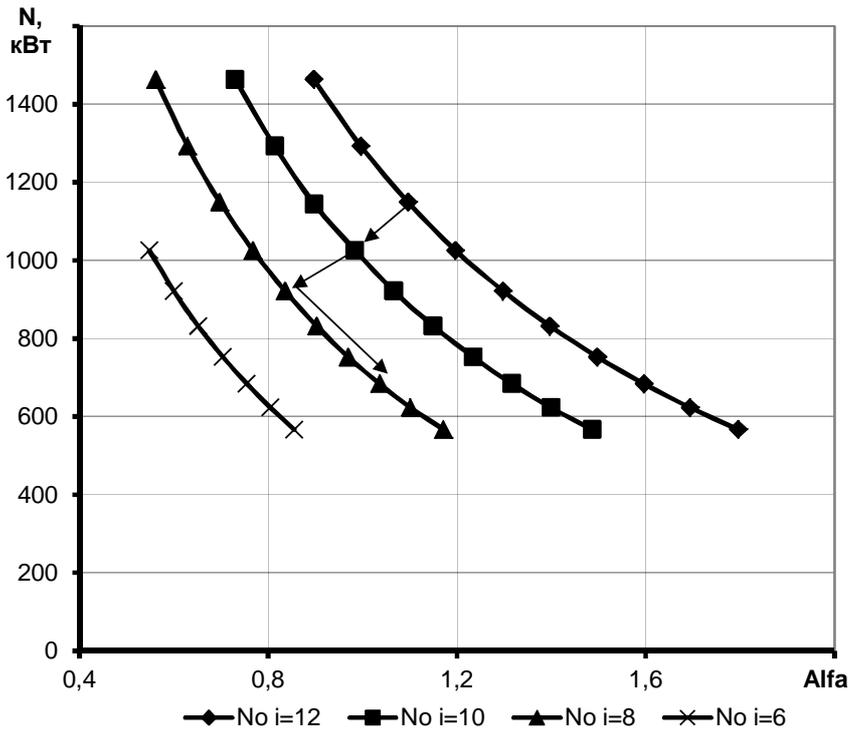


Рисунок 6 – Изменение располагаемой тепловой мощности от коэффициента избытка воздуха при отключении части цилиндров

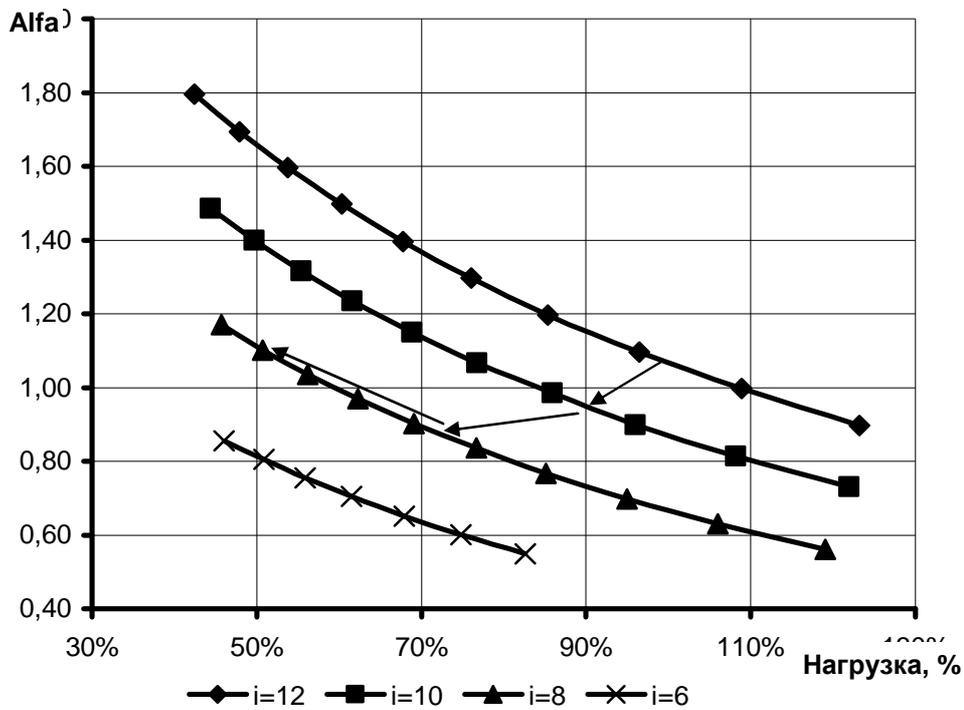


Рисунок 7 – Изменение коэффициента избытка воздуха от нагрузки при отключении части цилиндров

При отключении цилиндров и соответствующем увеличении цикловой порции газа электрическая и тепловая составляющие мощности меняются, ступенчато уменьшаясь на 10 %, 25 % и 50 %. Электрический КПД (около 33 %), тепловой КПД (около 55 %) и общий КПД (около 85 %) при этом остаются на прежнем уровне. Дальнейшее снижение отдаваемой электрической и тепловой мощности осуществляется количественным регулированием с помощью прикрытия дроссельной заслонки или другими словами снижением коэффициента наполнения двигателя.

При нагрузках меньших 50 % регулирование мощности генерирующей установки происходит только количественно, прикрытием дроссельной заслонки, так как качественное регулирование при таких уровнях нагрузки не дает никаких преимуществ, в том числе и при поддержании оптимального угла опережения зажигания.

Оптимальный угол опережения зажигания в диапазоне коэффициентов избытка воздуха 0,8 до 1,2 составляет 30° пкв до ВМТ. Дальнейшее обеднение газовой смеси должно сопровождаться постепенным увеличением угла до 40° пкв до ВМТ.

Коэффициент избытка воздуха для устойчивой работы двигателя на природном газе должен изменяться от 0,8 до 1,45. Концентрационные пределы по коэффициенту избытка воздуха для сгорания природного газа несколько шире, но за пределами указанного диапазона начинают действовать факторы, ухудшающие условия сгорания и приводящие к снижению показателей работы двигателя. Соответственно, отключение цилиндров происходит в границах указанного диапазона.

Заключение

Для обеспечения максимальной энергоэффективности газопоршневой мини-ТЭЦ необходимо обеспечить комбинированное управление мощностью: в диапазоне от 50 до 100% мощности осуществлять качественное управление мощностью за счет изменения цикловой порции при полностью открытой дроссельной заслонке, в диапазоне до 50% мощности необходим переход на количественное регулирование мощности за счет изменения положения дроссельной заслонки.

При снижении мощности отключение нескольких цилиндров обеспечивает работу на более экономичных режимах на частичных

нагрузках, по сравнению с работой всех цилиндров на тех же нагрузках, при этом наблюдается примерно одинаковый уровень механической и тепловой мощности для работающих цилиндров. Отключение более четырех цилиндров приводит к значительному обогащению топливовоздушной смеси (при качественном регулировании) и, соответственно, ухудшению экономических показателей установки.

Внедрение отключения части работающих цилиндров позволяет обеспечить повышение экономичности миниТЭЦ от 1 до 7 % (по эффективному КПД) в зависимости от режима работы.

За счет внедрения комбинированного регулирования мощности и отключения части работающих цилиндров на частичных режимах возможно обеспечить следующие показатели в диапазоне от 40 до 110% электрической мощности:

- электрический КПД - 31 - 33 %;
- тепловой КПД - 52 - 55 %;
- общий КПД миниТЭЦ - 80 - 85 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловые двигатели: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.Н. Нигматулина.- М. «Высшая школа», 1974. – 375 с.
2. Гольдинер, А.Я. Газопоршневые электроагрегаты / А.Я. Гольдинер, М.И. Цыркин, В.В. Бондаренко.– СПб.: Галлея Принт, 2006.– 240 с.
3. Лушпа, А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций / А.И. Лушпа.– М.: Машиностроение, 1981.– 240 с.
4. Кулманаков, С.П. Повышение энергоэффективности газопоршневого двигателя при работе на частичных режимах / С.П.Кулманаков, С.С.Кулманаков // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук.- 2011.- № 10.- С. 215-220.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

Кулманаков С.П., к.т.н., доц., докторант,
e-mail: spk_ice@mail.ru

Брякотин М.Э., к.т.н., доцент

Кулманаков С.С., аспирант

e-mail: D21200403@mail.ru

кафедра ДВС ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
тел. (83852) 260516,
656038, Барнаул, просп. Ленина, 46.