

jeksperimental'noj ustanovki dlja issledovanija universal'noj sistemy pitanja i regulirovanija gazodizel'noj jelektrostantsii / V.S. Verbovskij, I.V. Gricuk - Zbirnik naukovih prac' Donec'kogo institutu zalizničnogo transportu Ukraïns'koï derzhavnoi akademii zalizničnogo transportu. - Donec'k: DonIZT, 2010 – Vip. №21. – S.

159-172. 4. Dol-ganov K.E. Issledovanie toplivnoj jekonomichnosti i toksichnosti otrabotavshih gazov gazodizelja / K.E. Dolganov, V.S. Verbovskij i dr.. - 1991. - №8-9. – S. 6-9.

УДК 621.43

**С.П. Кулманаков, канд. техн. наук, М.Э. Брякотин, канд. техн. наук,
С.С. Кулманаков, асп.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ГАЗА И ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОПОРШНЕВЫХ МИНИ-ТЭЦ

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 топливовоздушного 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 топлива 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.

Теоретическая часть

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

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

$$Q_0 = Q_e + Q_g + Q_m + Q_z + Q_{ост},$$

где Q_0 – суммарное количество тепла, подведенное

к двигателю с топливом; Q_e – теплота, эквивалентная эффективной работе за 1с; Q_6 – количество тепла, уходящее в систему охлаждения; Q_m – количество тепла, уходящее в систему смазки; Q_2 – теплота, унесенная с выпускными газами; $Q_{ост}$ – остаточные (неучтенные) теплопотери.

Методика по определению данных составляющих широко известна. Теплота, унесенная с выпускными газами, вычисляется с учётом температуры и коэффициента избытка воздуха по следующей формуле [3]:

$$c_p^2 = -0,118 \cdot T_2 \cdot \alpha + 1,422 \cdot T_2 - 1,181 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha + 0,001$$

Номинальная электрическая мощность N_e определяется на клеммах генератора и численное значение его равно:

$$N_e = \eta_2 \cdot N_g$$

где η_2 – 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 газ газопоршневого электроагрегата определяются по электрической мощности и часовому расходу газа G_T , который является единственным источником энергии в генерирующей установке:

$$\eta_g = \frac{3600 \cdot N_g}{G_T \cdot H_u}$$

$$g_g = \frac{3600}{\eta_g \cdot H_u} = \frac{G_T}{N_g}$$

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

$$\eta_T = \frac{3600 \cdot P_T}{G_T \cdot H_u}$$

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

Общий КПД будет складываться из КПД по электрической мощности и термического КПД.

Итогом проведенного расчета служат графики, представленные на рис. 1, 2.

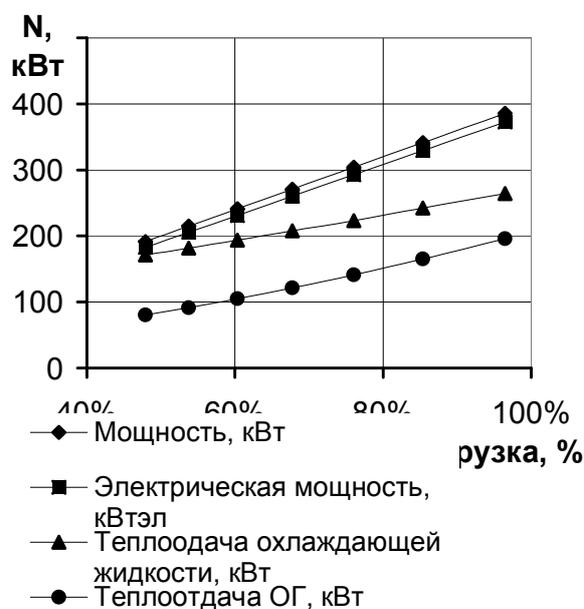


Рис. 1. Энергобаланс исследуемого двигателя.

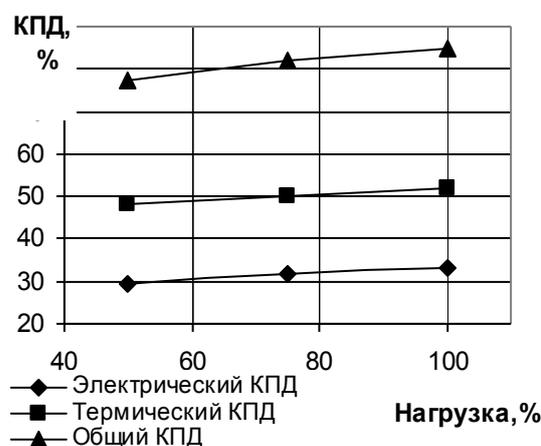


Рис. 2. Изменение КПД мини-ТЭЦ

Определение необходимого увеличения цикловой подачи топлива при отключении части цилиндров производится в предположении постоянства мощности и среднего давления трения механических потерь:

$$N_e = 1,577 \cdot \frac{q_u \cdot n \cdot i}{\tau} \eta_e = const'$$

откуда следует, что $q_u = \frac{N_e \cdot \tau}{1,577 \cdot n \cdot i \cdot \eta_e}$ при $i = var$. 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.

Математическое прогнозирование

Отключение двух цилиндров производится ступенчато при достижении нагрузки 90 % и ниже. Отключение четырех цилиндров осуществляется при достижении 75 % нагрузки и ниже. Отключение 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 (рис. 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 (рис.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 топли-

ва от коэффициента избытка воздуха и изменения коэффициента избытка воздуха от нагрузки (рис. 5–7).

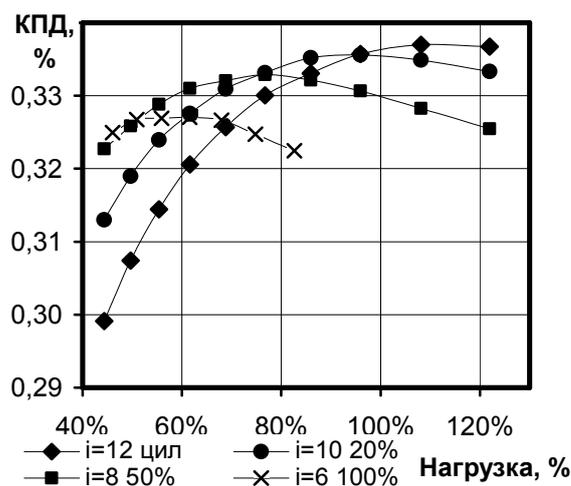


Рис. 3. Изменение эффективного КПД от нагрузки при отключении части цилиндров

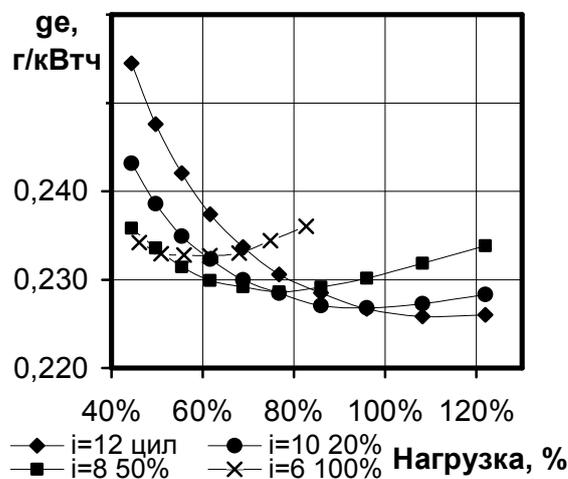


Рис. 4. Изменение удельного эффективного расхода топлива от нагрузки при отключении части цилиндров

Отключение более четырех цилиндров при одновременном увеличении цикловой подачи газа на 100 % сильно обогащает газозвоздушную 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 угарного

газа, который возможно утилизировать дожиганием. Отключение цилиндров позволяет поддерживать уровень максимального давления сгорания постоянным, сохраняя механическую нагруженность деталей ЦПГ на постоянном уровне.

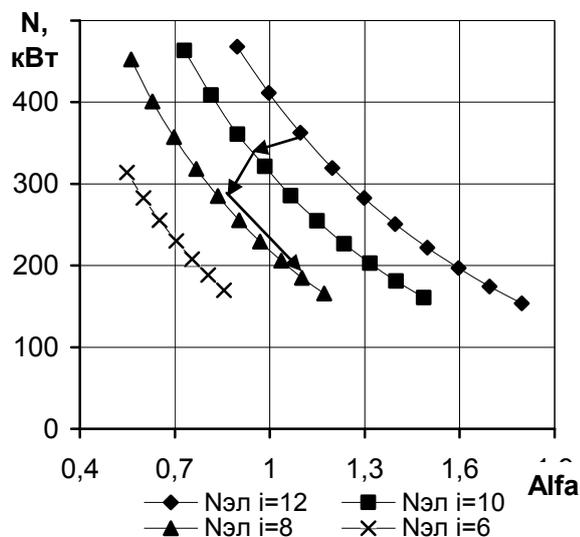


Рис. 5 Изменение электрической мощности от коэффициента избытка воздуха при отключении части цилиндров

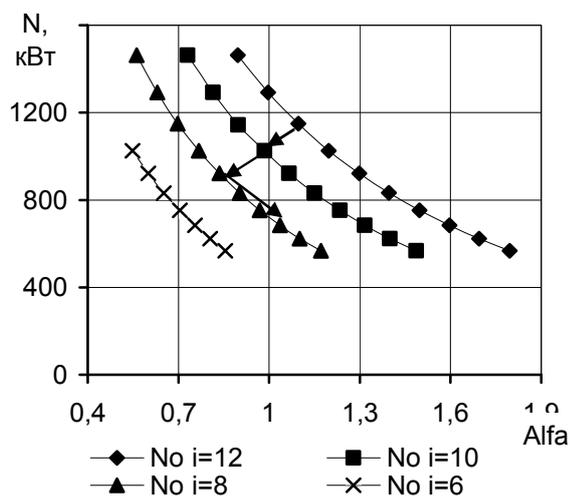


Рис. 6. Изменение располагаемой тепловой мощности от коэффициента избытка воздуха при отключении части цилиндров

Режим работы мини-ТЭЦ, с точки зрения состояния органов управления двигателем, характеризуется значением (величиной) подачи газа, углом открытия дроссельной заслонки и углом 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 к нуждам потребителя и повышение эффективности.

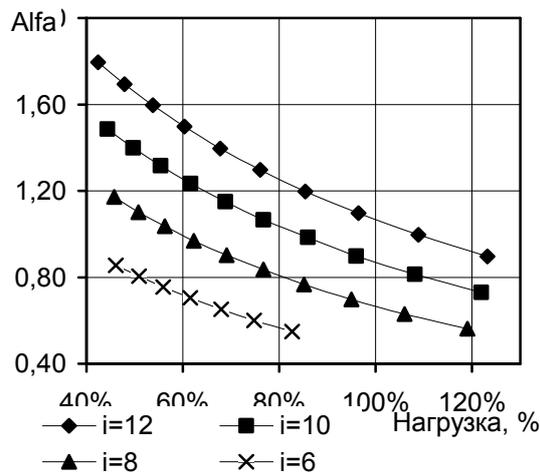


Рис. 7. Изменение коэффициента избытка воздуха от нагрузки при отключении части цилиндров

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. 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 от 0,8 до 1,2 составляет 30 °пкв до ВМТ. Дальнейшее

обеднение газовоздушной смеси должно сопровождаться постепенным увеличением угла до 40 °кв.

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 одинаковый уровень электрической и тепловой мощности. 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 эко-

номичности 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. *Кулманакон, С.П.Повышение энергоэффективности газопоршневого двигателя при работе на частичных режимах / С.П.Кулманакон, С.С.Кулманакон // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. - 2011.- № 10 - С. 215-220.*

Bibliography (transliterated):

1. *Teplovyje dvigateli: Ucheb. Posobie dlja vuzov / Pod red. I.N. Nigmatulina. M. «Vysshaja shkola», 1974. – 375 s.*
2. *Gol'diner, A.Ja. Gazoporshnevye jelektroagregaty / A.Ja.Gol'diner, M.I. Cyrkin, V.V. Bondarenko. – SPb.: Galleja Print, 2006. – 240 s.*
3. *Lushpa, A.I. Osnovy hi-micheskoj termodinamiki i kinetiki himicheskij reakcij / A.I. Lushpa. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 240 s.*
4. *Kulmanakov, S.P.Povyshenie jenergojeffektivnosti gazoporshnevoego dvigatelja pri rabote na chastichnyh rezhimah / S.P.Kulmanakov, S.S.Kulmanakov // Vestnik Sibirsogo otdelenija Akademii voennyh nauk. - 2011.- № 10 - S. 215-220.*

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

УДК 621.436

С. И. Тырловой, канд. техн. наук

УЧЕТ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВПРЫСКА В АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ

Постановка проблемы. В связи с возрастающим использованием аккумуляторных систем питания (АСП) возникают вопросы по определению и прогнозированию эксплуатационных расхо-

дов топлива транспортных установок с АСП при различных условиях эксплуатации, включающие в себя физические свойства топлива, износ элементов топливной аппаратуры, режимы работы. При