

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДВС ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СМЕСЕВОМ ТОПЛИВЕ

Юлия Александровна Плотникова, к.ф.-м.н., доцент кафедры "ТСА", инженерного факультета ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА им.Н.В. Верещагина  
 Андрей Владимирович Палицын, к.т.н., доцент кафедры "ЭСиТС", инженерного факультета ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА им. Н.В. Верещагина  
 Алексей Сергеевич Зубакин, инженер - консультант ООО "НПП "Гиперион"  
 Хуршед Азамович Имомкулов, магистрант инженерного факультета, ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА имени Н.В. Верещагина  
 Александр Николаевич Коротков, главный инженер ООО "СПК "Колхоз Андога", Вологодская область, Кадуйский р-он, с. Никольское

*Научные исследования по использованию альтернативных топлив, произведенных из отходов промышленных и сельскохозяйственных производств, а также местных биоресурсов, в качестве моторных топлив для поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются интернациональным трендом последнего десятилетия. ДВС работает на генераторном газе, произведенном в газогенераторной установке. Одной из основных проблем при переводе на генераторный газ ДВС является снижение эксплуатационных характеристик: мощности, крутящего момента, ухудшение приёмистости. Для её решения возможно использование смешанного топлива для ДВС, состоящего из генераторного газа с добавкой бензина. В статье рассматривается вариант оптимизации конструкции системы питания ДВС электростанции для работы на смешанном топливе. Проведено моделирование работы системы регулирования подачи бензина на лабораторном стенде. Для согласованной работы воздушной и дроссельной заслонки смесительного устройства предложена новая схема привода, использующая нелинейные элементы передачи. На ДВС 14 6,8/5,4 электростанции GG - 2700 проведена практическая апробация модернизированной системы питания.*

*Scientific research on the use of alternative fuels produced from industrial and agricultural waste, as well as local biological resources, as motor fuels for internal combustion piston engines (ICE) is an international trend of the last decade. The engine operates on generator gas produced in the gas generator set. One of the main problems in the transfer to the generator gas of the internal combustion engine is the reduction of operational characteristics: power, torque, deterioration of acceleration. To solve it, it is possible to use a mixed fuel for the internal combustion engine, consisting of a generator gas with the addition of gasoline. The article considers the option of optimizing the design of the power supply system of the power plant for operation on mixed fuel. The simulation of the operation of the system of regulating the supply of gasoline on a laboratory bench. For the coordinated operation of the air and throttle valves of the mixing device, a new drive scheme using nonlinear transmission elements is proposed. On ICE 14 6,8/5,4 plant GG - 2700 conducted practical testing of the upgraded power system.*

**Ключевые слова:** смешанное топливо, генераторный газ, система управления, эллиптическая передача, двигатель внутреннего сгорания.

**Keywords:** mixed fuel, generator gas, control system, elliptical transmission, internal combustion engine (ICE).

## Введение

Для снижения финансовых издержек в технологических циклах производства, при эксплуатации ДВС переводят с товарного на альтернативное моторное топливо. Например, заменяя бензин и дизельное топливо из ископаемых углеводородов на спиртовые композиции, природный газ, биогаз или генераторный газ [1, 2]. Это, с одной стороны, позволяет снизить затраты на топливо, улучшить экологические показатели отработавших газов ДВС, с другой - приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик: снижению номинальной литровой мощности ДВС, снижению перегрузочной способности и приёмистости ДВС. [3, 4, 5] Во многом это обусловлено меньшей энергетической ценностью альтернативного моторного топлива [6].

Для повышения эксплуатационных показателей ДВС при работе на альтернативных топливах используют различные технологические приемы и методы, такие как: увеличение удельной плотности топлива - воздушного заряда в цилиндре ДВС за счет применения системы наддува, использование смешанного топлива (альтернативного и товарного) для работы ДВС по газодизельному циклу, доработка конструкции ДВС с целью повышения степени сжатия, уменьшение сопротивления во впускном тракте и т. д. Для ДВС с искровым зажиганием эти методы не получили широкого распространения, что требует проведения дополнительных исследований и экспериментов в данном направлении.

**Цель исследования:** оптимизация конструкции системы питания ДВС для эксплуатации на генераторном газе.

## Задачи исследования:

- экспериментальное получение нагрузочной характеристики ДВС 14 6,8/5,4 электростанции GG - 2700 на бензине;
- разработка и практическая апробация алгоритма управления системой питания ДВС на генераторном газе с использованием нелинейных связей между регулирующими элементами.

**Материалы и методы.** Системы питания современных ДВС с искровым зажиганием сконструированы таким образом, чтобы при работе на бензине, для различных нагрузочных режимов, создавать оптимальную по составу топливо - воздушную смесь - обо-

гащенную на малых и номинальных нагрузочных режимах, и более бедную в среднем нагрузочном диапазоне. Проведенные поисковые исследования работы ДВС 14 6,8/5,4 электростанции GG-2700 это подтверждают. [7] Данная закономерность удельного расхода бензина явно прослеживается на полученной экспериментальной нагрузочной характеристике (рис 1), кривая 1. Кривая 2 на графике нагрузочной характеристики иллюстрирует функциональную зависимость температуры отработавших газов ДВС в зависимости от нагрузки. Кривая 3 показывает расход воздуха ДВС в зависимости от нагрузки. Кривая 4 удельного расхода топлива получена при продувке карбюратора ДВС 14 6,8/5,4 на лабораторной установке, при тех же значениях расхода воздуха через него, что и при снятии нагрузочной характеристики на электростанции GG - 2700. В качестве контрольной точки, для настройки карбюратора на объемную подачу бензина в 25 % от номинального расхода было принято значение номинальной (паспортной) мощности электростанции, равное 2 кВт [7].

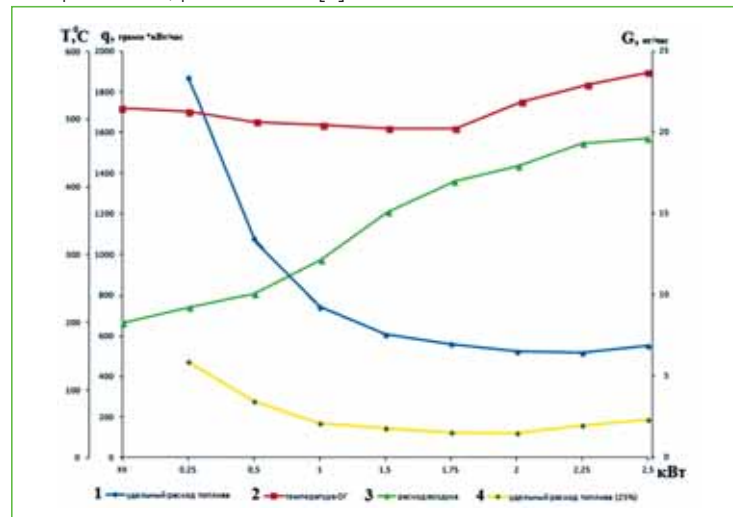


Рис. 1 - Нагрузочная характеристика ДВС 14 6,8/5,4 электростанции GG - 2700



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки для моделирования режимов работы системы питания ДВС (а), система регулирования подачи бензина: жиклёр с изменяемым сечением (б) и карбюратор с установленным модернизированным жиклёр (в)

Ухудшение эксплуатационных характеристик ДВС, работающего на генераторном газе, по сравнению с бензином, обуславливается низкой теплотворной способностью генераторного газа. На основании проведенных исследований [4, 5, 7] для компенсации потери мощности достаточно подавать 25-30% бензина. Подача дополнительной порции бензина может быть осуществлена с помощью карбюратора, подключенного последовательно со смесительным устройством.

Общий вид лабораторной установки и модернизированного карбюратора показан на рис. 2. Установленный жиклёр с регулируемым проходным сечением (рис.2 б) позволяет изменять подачу бензина от 0 до 100%, при одинаковом разрежении на впуске.

Сравнение 1 и 4 характеристик удельного расхода бензина ДВС показывает, что обогащение топливо-воздушной смеси дросселированием жиклера главной дозирующей системы является недостаточным условием для получения от ДВС, работающего на смешанном топливе, номинальных характеристик. С целью обогащения топливо-воздушного заряда на холостом ходу и номинальном режиме работы ДВС за счет коррекции подачи генераторного газа, разработана система управления дроссельной и воздушной заслонками с использованием эллиптической передачи с упругой связью (рис. 3).

Результаты и обсуждение. При использовании для работы ДВС смешанного топлива требуется введение промежуточного исполнительного механизма, позволяющего осуществлять изменение объе-

ма подаваемого топлива (количественное регулирование смеси) и одновременно корректировать подачу воздуха (качественное регулирование смеси). Для обогащения топливной смеси, при работе двигателя на холостом ходу и максимальной мощности, и обеднения при установившемся режиме работы ДВС требуется нелинейная зависимость открытия воздушной заслонки. Это возможно, если будет применена эллиптическая передача с гибкой нерастяжимой связью в приводе заслонок (рис.4, а).

Задавая соотношение радиусов эллипсов, можно получить различный качественный состав смеси при разных углах открытия дроссельной заслонки.

При расчёте эллиптической передачи применим следующие упрощения:

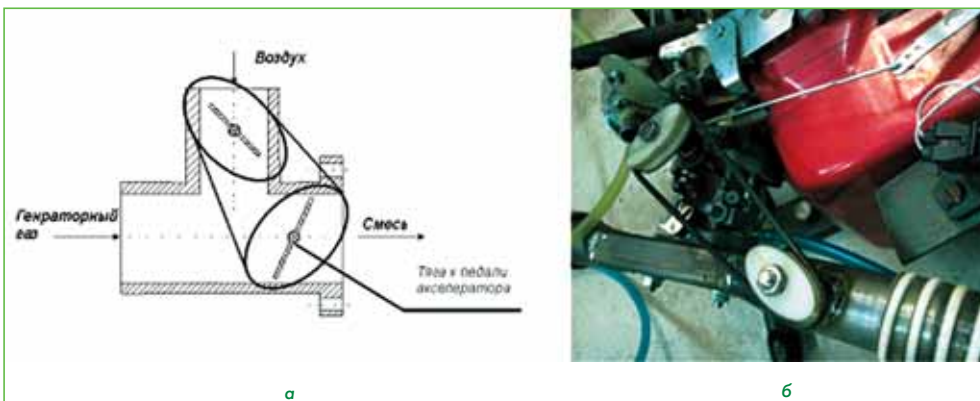


Рис. 3. Общий вид системы управления воздушной заслонкой с помощью эллиптической передачи (а) и практическое воплощение на экспериментальной установке (б)

- угол поворота эллипсов составляет 0...90°;
- длина гибкой связи постоянна во времени. [8]

Тогда, для описанных выше условий справедливо равенство:

$$w'p' = w p \quad (1)$$

- где  $w'$  - угловая скорость ведущего эллипса (ВЩ);
- $w$  - угловая скорость ведомого эллипса (ВМ);
- $p'$  - радиус-вектор точки ВЩ;
- $p$  - радиус-вектор точки ВМ.

Обозначим взаимосвязь между углами  $\alpha$  и  $\varphi$  поворота эллипсов как функцию:

$$\alpha = f(\varphi) \quad (2)$$

Тогда угловая скорость ведомого эллипса может быть найдена, как:

$$w = d\alpha/dt. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), угловую скорость эллипса в полярных координатах можно записать следующим образом:

$$W = \frac{d(f(\varphi))}{dt} = \frac{d\alpha}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\alpha}{d\varphi} \cdot W', \quad (4)$$

Уравнения для радиус-векторов в полярных координатах:

- для ведущего эллипса:

$$p' = \frac{R_1 R_2}{\sqrt{(R_1)^2 \sin^2 \varphi + (R_2)^2 \cos^2 \varphi}} \quad (5)$$

- для ведомого эллипса:

$$p = \frac{R_1 R_2}{\sqrt{(R_1)^2 \cos^2 \alpha + (R_2)^2 \sin^2 \alpha}} \quad (6)$$

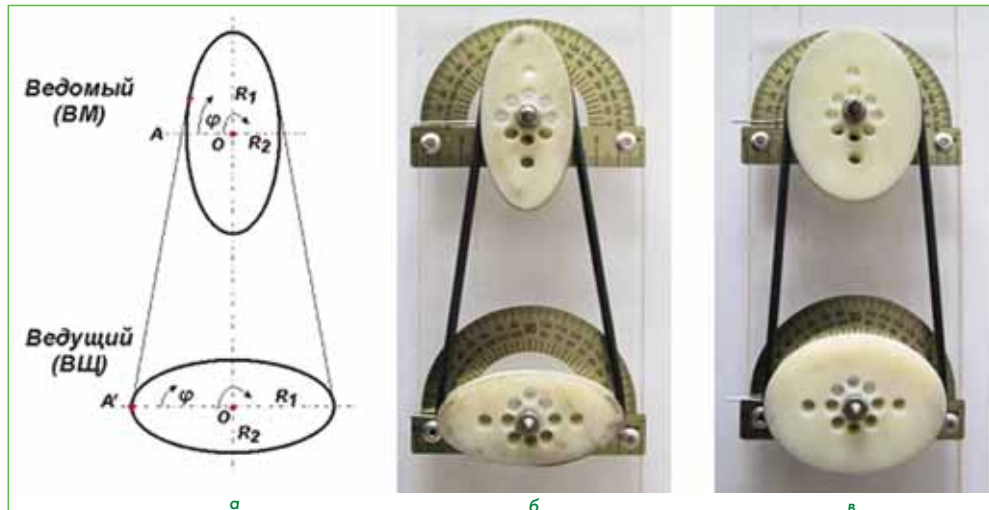


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и лабораторные модели (б), (в) эллиптической передачи с упругой связью.

где  $R_1$  и  $R_2$  - полуоси эллипсов, соответственно,  $(\rho', \varphi)$  и  $(\rho, \alpha)$  - координаты точек эллипса.

При  $\varphi=0$  и  $\alpha=0$  получим радиус-векторы точек  $A'$  и  $A$ , соответственно.

Подставив выражения (4), (5) и (6) в выражение (1), получим следующее дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$w' \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \sin^2 \varphi + (R_2)^2 \cdot \cos^2 \varphi}} = \frac{\frac{d\alpha}{d\varphi} \cdot w' \cdot R_1 \cdot R_2}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \cos^2 \alpha + (R_2)^2 \cdot \sin^2 \alpha}} =$$

$$w' \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \int \frac{d\varphi}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \sin^2 \varphi + (R_2)^2 \cdot \cos^2 \varphi}} = w' \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \int \frac{d\alpha}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \cos^2 \alpha + (R_2)^2 \cdot \sin^2 \alpha}} = (7)$$

$$\int \frac{d\varphi}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \sin^2 \varphi + (R_2)^2 \cdot \cos^2 \varphi}} = \int \frac{d\alpha}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \cos^2 \alpha + (R_2)^2 \cdot \sin^2 \alpha}}$$

В обеих частях равенства (7) стоят неполные эллиптические интегралы первого рода, которые не выражаются в конечном виде через элементарные функции, в связи с чем получить функцию  $\alpha=f(\varphi)$  в явном виде не представляется возможным. [9]

В неявном виде взаимосвязь  $\alpha=f(\varphi)$  имеет вид:

$$\int_0^\varphi \frac{dx}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \sin^2 x + (R_2)^2 \cdot \cos^2 x}} = \int_0^\alpha \frac{dx}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \cos^2 x + (R_2)^2 \cdot \sin^2 x}} \quad (8)$$

Далее решаем задачу по следующей схеме:

1. Задаём диапазон для  $\varphi$ :  $0^\circ, 1^\circ, \dots, 90^\circ$  с нужным шагом, значения углов выражаем в радианах.
2. С тем же шагом задаём диапазон для  $\alpha$ :  $0^\circ, 1^\circ, \dots, 90^\circ$ , значения углов выражаем в радианах.
3. Для полученных значений углов  $\alpha$  и  $\varphi$  методом численного интегрирования вычисляем интегралы для левой и правой части формулы (8).

$$\int_0^\varphi \frac{dx}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \sin^2 x + (R_2)^2 \cdot \cos^2 x}} \quad \text{и} \quad \int_0^\alpha \frac{dx}{\sqrt{(R_1)^2 \cdot \cos^2 x + (R_2)^2 \cdot \sin^2 x}}$$

4. Значения углов  $\alpha$  и  $\varphi$ , при которых значения интегралов совпадут - считаем тождественными.
5. Составляем таблицу совпавших углов:  $\alpha_1 \rightarrow \varphi_1, \alpha_2 \rightarrow \varphi_2, \alpha_3 \rightarrow \varphi_3, \dots, \alpha_n \rightarrow \varphi_n$ . Тем самым мы задаем искомую функцию  $\alpha=f(\varphi)$  в табличной форме.

Пользуясь таблицей, можно определить значения углов поворота для ведущего эллипса, обеспечивающих необходимые углы поворота ведомого эллипса.

Апробация полученной математической модели системы управления дроссельной и воздушной заслонками с использованием эллиптической передачи с упругой связью была выполнена на лабораторных моделях (рис.4, б и в). Эксперименты подтвердили адекватность экспериментальных и расчетных углов  $\alpha$  и  $\varphi$  поворота эллипсов.

Практическая реализация предложенной системы управления и поисковые эксперименты, выполненные на ДВС 1Ч 6,8/5,4 электростанции GG - 2700, дали положительные результаты. Электрическая мощность, отдаваемая в нагрузку электростанцией при работе ДВС на смеси генераторного газа и бензина, сопоставима с электрической мощностью при работе ДВС только на одном бензине. Для улучшения динамических характеристик ДВС, работающего на смесевом топливе, требуется проведение дополнительных исследований для определения оптимальных соотношений большого и малого радиусов взаимодействующих эллипсов, их начальных фаз, а также влияние на функцию эллиптической передачи введения эксцентриситета оси поворота эллипса.

### Заключение

На основании проведенных теоретических и практических исследований можно сделать следующие выводы:

- смесевое топливо для работы ДВС электростанции, состоящее из генераторного газа с добавкой бензина, является полноценной заменой чистого бензина, как топлива;
- для компенсации потери мощности на переходных режимах,

при работе ДВС электростанции на смесевом топливе, разработан алгоритм управления системой питания ДВС на генераторном газе с использованием нелинейных связей между регулирующими элементами;

- практическая апробация предложенной системы питания ДВС на лабораторных моделях и на ДВС 1Ч 6,8/5,4 электростанции GG - 2700 подтверждает адекватность и работоспособность разработанной системы;

- для улучшения динамических характеристик ДВС, работающего на смесевом топливе, требуется проведение дополнительных исследований для определения оптимальных соотношений большого и малого радиусов взаимодействующих эллипсов, их начальных фаз, а также влияние на функцию эллиптической передачи введения эксцентриситета оси поворота эллипса.

### Литература:

- 1) Coal and Biomass. Gasication. Santanu De Avinash Kumar Agarwal. V. S. Moholkar Bhaskar Thallada Editors .Energy, Environment, and Sustainability. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. <https://doi.org/10.1007/978981107335>
- 2) Technology roadmap bioenergy for heat and power (2012). International Energy Agency. [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012\\_Bioenergy\\_Roadmap\\_2nd\\_Edition\\_WEB.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Bioenergy_Roadmap_2nd_Edition_WEB.pdf). Accessed Aug. 2016.
5. J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGrawHill. International Editions, 1988
6. IСЕМ CFD Engineering, From CAD to Grid Generation for Analysis, <http://www.icemcfd.com>
- 3) Система питания двигателя внутреннего сгорания генераторным газом Плотников С.А., Острецов В.Н., Киприянов Ф.А., Палицын А.В., Зубакин А.С., Коротков А.Н. патент на изобретение RUS 2605870 11.09.2015
- 4) Определение оптимального угла опережения зажигания двигателя 1Ч 6,8/5,4 при работе на генераторном газе и смеси бензина и генераторного газа. Зубакин А.С., Кузнецов А.С., Успехи современной науки. 2017. № 7. С. 132 - 136.
- 5) Плотников С.А. Исследование электростанции, работающей на альтернативном топливе / С.А. Плотников, А.С. Зубакин, А.Н. Коротков // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики, выпуск 17, по материалам IX Международной научно -практической конференции "Наука Технология Ресурсосбережение".- Киров, 2016 г. С. 220 - 224.
- 6) Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства / Под ред. директора Департамента научно-технологической политики и образования Минсельхоза России В.В. Нунгезера, акад. Россельхозакадемии Ю.Ф. Лачуги и чл.-корр. Россельхозакадемии В.Ф. Федоренко // - Ч. II. - М.: ФГБНУ "Росинформагротех", 2011. - 492 с.
- 7) Имомкулов Х.А. Результаты поисковых исследований по оптимизации эксплуатационных характеристик ДВС электростанции при работе на альтернативных моторных топливах / Х.А. Имомкулов, А.Н. Коротков, А.В. Палицын, А.С. Зубакин / В сборнике научных трудов по результатам работы II всероссийской с международным участием научно-практической конференции "Молодые исследователи - развитию молочного хозяйственной отрасли". Часть 1. Вологда - Молочное, 2018. С 142 - 147.
- 8) Корн Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.А. Корн, Т.М. Корн. - М.: Наука, 1978. - 831 с.
- 9) Плотников М.Г. Интегральное исчисление функции одной переменной/ М.Г. Плотников, Ю.А. Плотникова, Е.В. Дурова, С.Н. Мариничева / Методическое пособие для студентов ВГМХА им. Н.В. Верещагина, изучающих дисциплины "Математика", "Высшая математика", "Математический анализ" / Вологда-Молочное, 2013. - 57 с.

Связь с авторами: [MeсFac@yandex.ru](mailto:MeсFac@yandex.ru)  
[expert35@mail.ru](mailto:expert35@mail.ru)