

УДК 621.528

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Н.Н. Дураев\*, С.Г. Обухов, И.А. Плотников

Томский политехнический университет

\* ОАО «Сахаэнерго», г. Якутск

E-mail: serob99@mail.ru

*Представлена простая имитационная модель дизельного двигателя, построенная по результатам его экспериментальных испытаний. Модель реализована в программной среде MatLab Simulink, обеспечивает адекватное воспроизведение рабочих характеристик дизельного двигателя на переменной частоте вращения и может быть использована для поиска и разработки эффективных алгоритмов управления рабочими режимами дизельной электростанции инверторного типа.*

### **Ключевые слова:**

*Дизельный двигатель, дизель-генераторная установка, дизельная электростанция инверторного типа.*

### **Key words:**

*Diesel engine, diesel-driven generators, variable speed diesel generator set.*

На протяжении многих лет дизельные электростанции (ДЭС) остаются основным источником питания систем автономного электроснабжения потребителей, и полноценной замены им на сегодняшний день нет. Из недостатков ДЭС отмечают высокую себестоимость генерируемой электроэнергии, обусловленную постоянным ростом цен на дизельное топливо и затраты на его доставку, относительно небольшой эксплуатационный ресурс дизельных двигателей, вредные выбросы в атмосферу.

Большая часть территорий России относится к зонам децентрализованного электроснабжения, и повышение энергетической эффективности ДЭС является актуальной задачей развития энергетики страны не только в экономическом, но и социальном плане.

Перспективным направлением повышения энергетической эффективности ДЭС, широко обсуждаемым в последние годы, является разработка и создание «инверторных» дизельных электростанций и автономных энергетических комплексов на их основе [1–4].

Под термином «инверторная» понимается дизель-генераторная установка, работающая на переменной частоте вращения, выходное напряжение которой приводится к стандартным параметрам с помощью силового полупроводникового каскада выпрямитель–инвертор (преобразователя частоты). Достоинством инверторных ДЭС, в сравнении с дизельными электростанциями общепромышленного применения, является значительное уменьшение удельного расхода топлива, обеспечиваемое автоматическим переводом дизельного двигателя на оптимальную частоту вращения по критерию минимального расхода топлива в зависимости от величины электрической нагрузки.

Важным достоинством ДЭС инверторного типа является также возможность простого объединения в рамках единой изолированной энергетической системы разнотипных энергетических устано-

вок различной физической природы (например, установок возобновляемой энергетики, буферного накопителя энергии и пр.), путем их подключения к вставке постоянного тока [5].

Одной из самых сложных задач создания инверторных ДЭС является разработка специализированных устройств автоматического регулирования, обеспечивающих управление рабочими режимами дизель-генераторной установки по заданным законам, исходя из критерия минимума расхода топлива. Энергетические характеристики инверторной ДЭС во многом определяются используемыми алгоритмами управления, поиск и разработка которых вызывают необходимость создания математической модели изолированной энергетической системы, содержащей модели дизельного двигателя, синхронного генератора, управляемых силовых преобразователей, буферного накопителя энергии и модели электрической нагрузки автономного потребителя.

Важным компонентом является математическая модель дизельного двигателя, позволяющая проводить исследования его рабочих режимов как на коротких интервалах модельного времени с целью изучения переходных процессов в системе, так и на длительных интервалах с целью отработки алгоритмов управления всем комплексом и определения энергоэффективных режимов его функционирования. Разработке данной имитационной модели и посвящена настоящая работа.

Объектом исследований в данной работе является дизельный двигатель, работающий в составе инверторной ДЭС на переменной частоте вращения. Цель исследований заключается в создании математической модели дизельного двигателя, адекватно отражающей его рабочие характеристики, устанавливающие связь между его основными эксплуатационными параметрами: мощностью, частотой вращения, расходом топлива и положением рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД).

Так как целью исследования не является изменение конструкции самого двигателя и систем его обеспечения, использование для целей моделирования математических моделей двигателей внутреннего сгорания, построенных на основе дифференциальных уравнений термо- и газодинамики [6, 7], представляется избыточным и сложным.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать относительно простую имитационную модель дизельного двигателя (ДД), построенную по результатам его экспериментальных испытаний.

В качестве исходных данных при создании модели использовались результаты экспериментальных исследований рабочих режимов ДД Кірог КМ2V80, входящего в состав дизельной электростанции KDE12EA3 (КНР) [8]. Для проведения экспериментальных исследований в Томском политехническом университете был разработан и изготовлен лабораторный комплекс «автономная ветродизельная электростанция» [9].

При создании математической модели ДД предполагалось, что дизельный двигатель, включенный в состав ДЭС, имеет всережимный регулятор частоты вращения вала двигателя. Основное уравнение динамики двигателя имеет вид:

$$(J_{\text{д}} + J_{\text{сг}}) \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M_{\text{д}} - M_{\text{н}}, \quad (1)$$

где  $J_{\text{д}}$ ,  $J_{\text{сг}}$  – моменты инерции ДД и синхронного электрического генератора, соответственно;  $\omega_{\text{д}}$  – угловая частота вращения вала;  $M_{\text{д}}$  – момент, развиваемый двигателем;  $M_{\text{н}}$  – момент нагрузки на валу.

Вырабатываемая двигателем механическая мощность на выходном валу определяется соотношением:

$$P_{\text{д}} = M_{\text{д}} \omega_{\text{д}}.$$

Уравнение (1) представляет собой нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка, что крайне усложняет проведение исследований в аналитической форме. Функция момента ДД является многопараметрической нелинейной функцией большого числа параметров:

$$M_{\text{д}} = M_{\text{д}}(\omega_{\text{д}}, h, G, T, \dots),$$

где  $h$  – положение органа управления ТНВД двигателя в абсолютных или относительных единицах измерения;  $G$  – расход топлива;  $T$  – температура двигателя и пр.

Как показали экспериментальные исследования, для установившегося температурного режима работы ДД с большой степенью точности можно считать, что  $M_{\text{д}}$  является функцией двух параметров  $\omega_{\text{д}}$  и  $h$ , если двигатель работает на одной из ветвей регуляторной характеристики. На рис. 1 приведены полученные экспериментальные характеристики  $M_{\text{д}}(n)$  двигателя КМ2V80 для различных значений положения рабочего органа ТНВД,  $n=30\omega_{\text{д}}/\pi$  – частота вращения вала двигателя, об/мин.

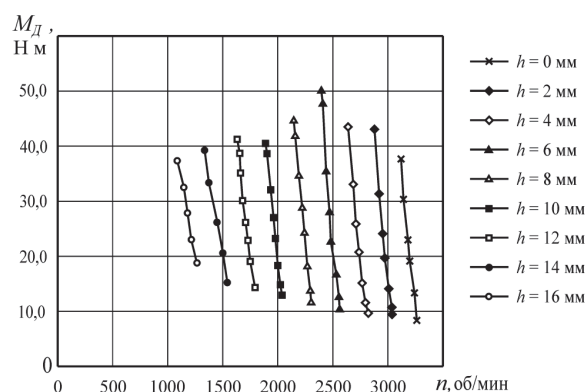


Рис. 1. Экспериментальные зависимости момента  $M_{\text{д}}$  дизельного двигателя КМ2V80 от частоты вращения  $n$  и положения  $h$  рабочего органа ТНВД

При проведении экспериментов регулировочный винт рейки топливного насоса для каждой серии экспериментов устанавливался в новое положение со смещением от предыдущего на 2 мм. Для характеристики положения регулировочного винта приняты соответствующие обозначения: например,  $h=4$  мм – рейка топливного насоса смещена на 4 мм от исходного положения (заводская установка) в сторону уменьшения цикловой подачи топлива.

Из рис. 1 видно, что зависимости  $M_{\text{д}}(n)$  в рассматриваемой области близки к линейным и могут быть аппроксимированы выражением:

$$M_{\text{д}}^h(n) = K(h)[n - n_0(h)],$$

где  $M_{\text{д}}^h(n)$  – зависимость момента ДД от частоты вращения вала двигателя при фиксированном положении рабочего органа ТНВД;  $K(h)$  – коэффициент, характеризующий жесткость механической характеристики двигателя;  $n_0(h)$  – скорость холостого хода при текущем положении рабочего органа ТНВД.

Зависимость  $n_0(h)$  с большой степенью точности можно представить в виде линейной функции:

$$n_0(h) = N_0 - ah,$$

где  $N_0$  – скорость холостого хода ДД на внешней характеристике;  $a$  – постоянный коэффициент.

Зависимость  $K(h)$  более сложная. Это объясняется тем, что в областях малых и больших скоростей вращения двигателя для обогащенной и обедненной топливной смеси нарушается нормальный процесс горения топлива. Жесткость механической характеристики с увеличением  $h$  падает. Зависимость  $K(h)$  можно аппроксимировать полиномиальной функцией второго порядка:

$$K(h) = b_2 h^2 - b_1 h - b_0, \quad (2)$$

где  $b_2$ ,  $b_1$ ,  $b_0$  – постоянные коэффициенты.

На рис. 2 показан вид аппроксимирующей функции (2) и для сравнения приведены значения коэффициента жесткости регуляторных характеристик двигателя, полученные по экспериментальным данным.

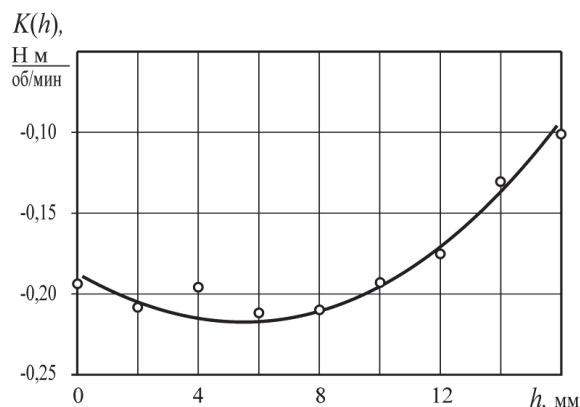


Рис. 2. Изменение  $K(h)$  от положения рабочего органа ТНВД

Если момент нагрузки на валу ДД превышает некоторое значение, то работа двигателя продолжается по внешней механической характеристике. Эту характеристику можно представить в виде линейной функции  $M_{\text{д}} = M_{\text{max}} = \text{const}$ , где  $M_{\text{max}}$  – максимальный момент, развиваемый двигателем. При уменьшении частоты вращения вала менее некоторого значения  $n_{\text{min}}$  работа двигателя становится неустойчивой и ДД останавливается, что также необходимо учесть в имитационной модели. Таким образом, механические характеристики двигателя, оснащенного всережимным регулятором, при имитационном моделировании могут быть представлены набором кусочно-линейных функций. Их вид для трех значений положения рейки ТНВД  $h=0, 8, 16$  мм показан на рис. 3.

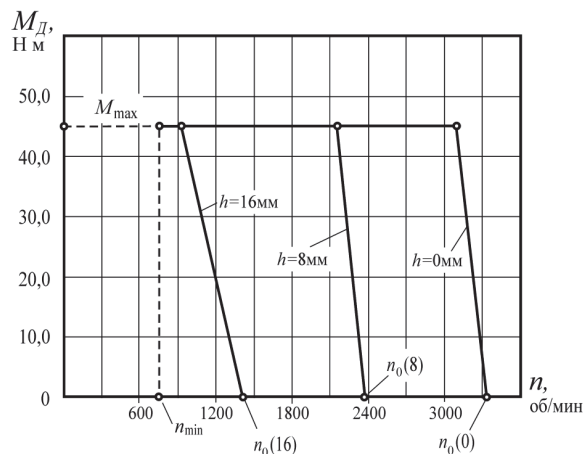


Рис. 3. Кусочно-линейное представление механических характеристик ДД

При компьютерном моделировании ДД и ДЭС на их основе с целью выявления и оценки экономических режимов работы необходимо иметь информацию о мгновенном и абсолютном расходе топлива. Зависимость расхода топлива от действующего на валу момента двигателя и от положения рабочего органа ТНВД можно представить в виде:

$$G = G_0 - c_1 h + (c_2 - c_3 h) M_{\text{д}},$$

где  $G_0$  – расход топлива ДД на холостом ходу при  $h=0$  мм;  $c_1, c_2, c_3$  – постоянные коэффициенты.

Расчетные зависимости расхода топлива двигателем КМ2V80 представлены на рис. 4. Значками обозначены точки, соответствующие экспериментальным данным для указанных значений положения рейки топливного насоса.

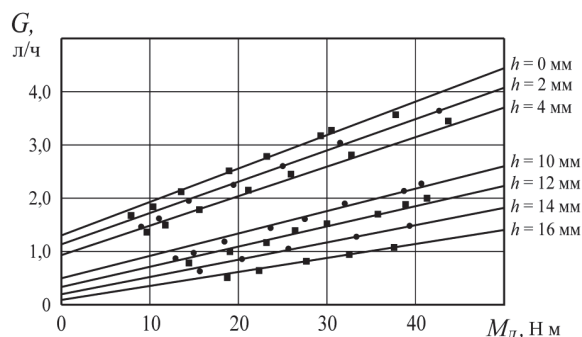


Рис. 4. Зависимости расхода топлива двигателя КМ2V80 от момента на валу и положения рабочего органа ТНВД

Динамические свойства ДД при моделировании учитывались за счет наличия момента сил инерции в уравнении (1), а также путем введения в модель звена запаздывания  $e^{-s\tau}$  с переменной временной задержкой  $\tau$ , характеризующего конечную скорость горения топлива в камере сгорания двигателя. Временная задержка определяется из выражения [10]

$$\tau = \frac{60S}{2Qn} + \frac{60}{4n},$$

где  $S$  – количество тактов в рабочем цикле двигателя;  $Q$  – количество цилиндров.

Для двигателя КМ2V80 временная задержка составляет 75 мс при  $n=1000$  об/мин и 25 мс при  $n=3000$  об/мин. При имитационном моделировании режимов работы ДД на временных интервалах, превышающих десятки минут, данное звено можно исключить из-за его незначительного влияния. Динамика регулятора положения рабочего органа топливного насоса также учитывалась только при исследовании переходных режимов работы двигателя.

На основании изложенных выше положений была построена имитационная компьютерная модель ДД в программной среде MatLab R2009b Simulink, представленная на рис. 5.

Модель имеет четыре скалярных входа и один векторный выход. Входы предназначены для: «h» – задания перемещения рабочего органа ТНВД, мм; «On/Off» – разрешение/запрещение работы ДД (цепь данного входа имитирует работу топливного клапана); «Start\_Dis» – запуск ДД (цепь имитирует работу системы запуска двигателя); «ML» – задания момента сопротивления (нагрузки), действующего на валу двигателя, Нм.

Была проведена оценка адекватности построенной модели ДД. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными для двигателя Kiror КМ2V80. Максимальные ошибки модели при определении частоты вращения вала двигателя не превышают 6,6 % и возника-

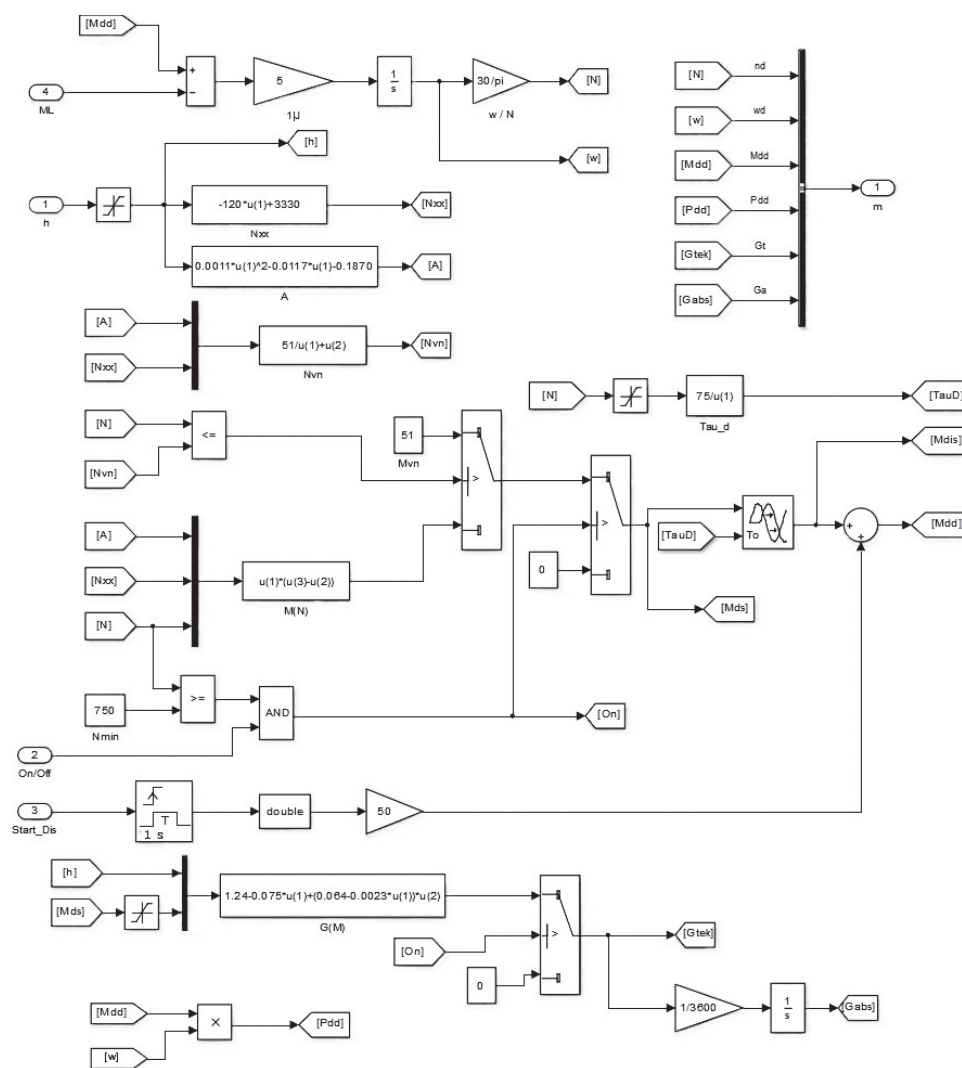


Рис. 5. Компьютерная имитационная модель дизельного двигателя в программной среде MatLab Simulink

ют при больших отклонениях рабочего органа ТНВД двигателя. Это объясняется тем, что при значениях  $h$  (больше 14 мм) при эксперименте работа дизеля была неустойчивой, сопровождалась повышенным уровнем вибрации и нестабильностью частоты вращения. Во всех других режимах средняя погрешность расчетов частоты вращения была не более 1,1%. Максимальная ошибка модели по расходу топлива не превышала 14,6% и наблюдалась также при критических режимах работы ДД. В возможной зоне регулирования частоты вращения двигателя при  $h=0...8$  мм средняя приведенная погрешность по расходу топлива составила 3,5%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // Ecologic Vehicles and Renewable Energies: Proc. of International Conference (EVER). – Monaco, 26–29 March 2009. URL: <http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ps/EVER09-paper-plenary1.pdf> (дата обращения: 01.06.2012).
2. Kurka O., Leuchter J. New Generation of Mobile Electrical Power Sources // The International Conference on Electrical Machines (ICEM 2000). – Helsinki: ICEM Press, 2000. – V. III. – P. 1366–1369.
3. Lee J.H., Lee S.H., Sul S.K. Variable-Speed Engine Generator with Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2009. – V. 45. – № 6. – P. 2130–2135.

4. Tolbert L.M., Peterson W.A., Scudiere M.B., White C.P., Theiss T.J., Andriulli J.B., Ayers C.W., Farquharson G., Ott G.W., Seiber L.E. Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – September 30–October 4, 2001. – P. 1763–1768.
5. Обухов С.Г., Плотников И.А. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // Промышленная энергетика. – 2012. – № 7. – С. 46–51.
6. Гаврилов В.В. Математическая модель теплообмена при испарении топлива в дизеле // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 57–61.
7. Машенко В.Ю. Программа CYBERDIESEL для математического моделирования топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 62–66.
8. Сайт компании Kipor. 2012. URL: <http://www.kipor.com> (дата обращения: 01.12.2012).
9. Маров Д.Ю. Лабораторный комплекс для исследования режимов работы ветро-дизельной энергетической установки // Современные техника и технологии (СТТ-2012): Сборник трудов XVIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 71–72.
10. Pena R., Cardenas R., Proboste J., Clare J., Asher G. Wind-Diesel Generation Using Doubly Fed Induction Machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2008. – V. 23. – № 1. – P. 202–214.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.181.018: 504.3.054

## ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ОТ КОТЕЛЬНЫХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.С. Тайлашева, Л.Г. Красильникова\*, Е.С. Воронцова

Томский политехнический университет

\*ООО «Спейс-Энергоаудит», г. Томск

E-mail: [taylasheva@tpu.ru](mailto:taylasheva@tpu.ru)

Представлены результаты расчета выбросов вредных веществ в атмосферу от отопительных котельных Томской области. Показано, что предельно допустимая концентрация вредных выбросов не превышена.

### Ключевые слова:

Вредные выбросы, оксиды азота, оксид серы, оксид углерода, твердые частицы, малая энергетика, котельная, предельно допустимая концентрация.

### Key words:

Noxious emission, nitrogen oxides, sulfur oxide, carbon oxides, solid particles, small energy, boiler house, maximum permissible concentration.

### Введение

Взаимозависимость условий обеспечения теплоэнергоснабжения и загрязнения окружающей среды как факторов жизнедеятельности человека и развития производственных сил привлекает внимание к этому аспекту проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду. Выбросы загрязняющих веществ предприятий теплоэнергетики, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных пылегазовоздушных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его использования, а также с эффективностью в целом работы источника теплоснабжения.

Антропогенные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ – один из основных факторов, обуславливающих изменение химического состава атмосферы и ее теплового баланса. Процессы добычи, переработки и сжигания органического топлива являются источником примерно 80 % суммарных объемов антропогенных выбросов в атмосферу, в том числе 90 % диоксида углерода – глав-

ного парникового компонента атмосферы, изменение содержания которого называют основной причиной современного повышения температуры [1].

При сжигании твердого топлива, прежде всего угля, в атмосферу с дымовыми газами поступает летучая зола, частицы которой содержат углерод, диоксид кремния, окислы алюминия и железа, серу, некоторые органические соединения, тяжелые металлы и другие химические элементы. При сжигании жидкого и газового топлива выход твердых частиц значительно меньше, однако они и газообразные продукты характеризуются высокими концентрациями многих вредных химических веществ [2].

Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют не имеющие средств очистки дымовых газов многочисленные теплоисточники малой мощности, размещаемые, как правило, в пределах небольших населенных пунктов.

Тепло- и энергоснабжение в большинстве районов Томской области лежит на плечах «малой» энергетики, энергоснабжающие организации ко-