

УДК 621.436

Описание зависимостей между параметрами рабочего процесса динамической модели комбинированного дизеля

А.Г. Кузнецов

Предложен метод описания полиномами функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса для динамической модели комбинированного дизеля.

Ключевые слова: рабочий процесс, комбинированный дизель, динамическая модель, полиномы.

The method of polynomial description of the functional dependence between operational parameters for a dynamic diesel model is offered.

Keywords: operation, diesel multiple unit, dynamic model, polynomial.

Как показано в работе [1], при полунатурном моделировании в «быстрой» динамической модели комбинированного дизеля необходимо задать следующие зависимости между параметрами рабочего процесса: индикаторный КПД $\eta_i(\omega_d, \alpha)$, коэффициент наполнения $\eta_v(\omega_d, p_k)$, цикловую подачу топлива $g_u(\omega_d, h)$, температуру отработавших газов $T_r(\omega_d, \alpha, p_k)$, момент сопротивления внутренних потерь $M_c(\omega_d, p_k)$, момент нагрузки $M_n(\omega_d, N)$, адиабатный КПД компрессора $\eta_{к.ад}(\omega_t, \pi_k)$, эффективный КПД турбины $\eta_t(\omega_{т.пр}, \pi_t)$, расход воздуха через компрессор $G_k(\omega_t, \pi_t)$, приведенный расход газов через турбину $G_{т.пр}(\omega_{т.пр}, \pi_t)$. Здесь $G_{т.пр} = G_t \sqrt{T_t^*} / p_t^*$; T_t^* и p_t^* — температура и давление заторможенного потока на входе в колесо турбины; ω_d — угловая скорость вала дизеля; ω_t и $\omega_{т.пр} = \omega_t / \sqrt{T_t^*}$ — угловая скорость и приведенная угловая скорость ротора турбокомпрессора; α — коэффициент избытка воздуха; p_k — давление надувочного воздуха, h — положение органа изменения топливоподачи; N — настройка потребителя; π_k — степень повышения давления в компрессоре; π_t — степень понижения давления газов в турбине.

Исходными данными для математического описания выбранных зависимостей служат результаты экспериментальных исследований дизеля и турбокомпрессора. Для дизеля это, обычно, набор нагрузочных или скоростных характеристик, для турбокомпрессора — универсальные характеристики компрессора и турбины.

Как показывает практика, экспериментальные данные как правило засорены шумами и могут содержать значительные случайные погрешности измерений. В этом случае применение различных видов интерполяции и аппроксимации не дает правильного представления функциональной зависимости. Возникает необходимость либо в от-



КУЗНЕЦОВ

Александр Гаврилович
доктор технических наук,
профессор
кафедры «Теплофизика»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

дельной предварительной статистической обработке данных, либо в ее применении в процессе получения аппроксимирующего выражения. Последнее лежит в основе широко используемого вида аппроксимации — регрессии. Здесь наибольшее распространение получил метод наименьших квадратов, который заключается в нахождении функции регрессии, при которой поверхность функции проходит в «облаке» узловых точек, обеспечивая наименьшую среднеквадратическую погрешность вычислений для всей совокупности этих точек.

В настоящее время хорошо разработана математическая теория для многомерных гауссовских наблюдений [2], т. е. для случайных величин, подчиняющихся многомерному нормальному распределению. Построение многомерных версий другими статистическими методами (например, непараметрическими [3]) удается далеко не так легко. Из-за этого, в частности, рассчитанные на гауссовские данные правила нередко приходится применять и там, где для этого нет достаточных оснований.

Первым шагом решения регрессионной задачи для рассматриваемых зависимостей являлось предположение о возможном виде функциональной связи между выбранными переменными [4]. Рассматривались линейные комбинации степенных функций с вещественным показателем. Такой выбор определен с одной стороны тем, что это наиболее простой и удобный для практических расчетов вид зависимости, а с другой — графическим анализом исходных данных. Проведение линейной регрессии общего вида уже на начальном этапе подбора модели подтверждало правильность выдвинутого предположения о характере функциональной зависимости.

Рассматривались также варианты решения задачи нелинейной регрессии общего вида в широком диапазоне допустимых функций. Использование нелинейных моделей не привело к каким-нибудь значимым результатам, поэтому основной упор был сделан на повышение качества моделей линейной регрессии.

Использование степенных функций с положительными действительными показателями в качестве базисных позволило описать имею-

щиеся данные лишь в ограниченном, хотя и достаточно широком интервале значений. Проблема была решена посредством введения в линейную комбинацию членов, представляющих собой различные сочетания произведений степенных функций с вещественными показателями различных независимых переменных. Помимо этого существенно возросло качество предсказаний использованными моделями опытных данных. Полученную степень соответствия регрессионной модели исходным данным по шкале Чеддока можно классифицировать как весьма высокую.

Подбор вида полиномов осуществлялся по критерию высокой точности приближения при возможно более простой структуре полиномов. Графическое отображение полиномов в виде поверхностей и сечений этих поверхностей, по сути — зависимостей между параметрами двигателя, должно соответствовать физической картине рабочего процесса. Была проведена большая предварительная работа по подбору вида полиномов, в результате которой получены следующие рекомендации по их составлению. Полиномы должны включать члены как в положительной, так и в отрицательной степенях, наибольшая степень полиномов, в основном, от -3 до $+3$. Полный состав таких полиномов даже для двух переменных включает большое число членов. Понадобилась кропотливая работа по подбору вариантов структуры полиномов, прежде чем окончательно был выбран их вид. Из состава полиномов удалялись члены, оказывающие малозаметное влияние на точность приближения. Выбранные полиномы содержат минимально возможное количество членов, набор которых обеспечивает высокую точность приближения.

Полиномы должны правильно описывать зависимости между параметрами рабочего процесса не только в области исходных данных, но и за ее пределами. Анализ вида поверхностей, графически отображающих полиномы, показал, что повышение степени полиномов приводит в ряде случаев к резкому изменению описываемых параметров в зонах, примыкающих к заданной области исходных данных, что не соответствует закономерностям рабочего про-

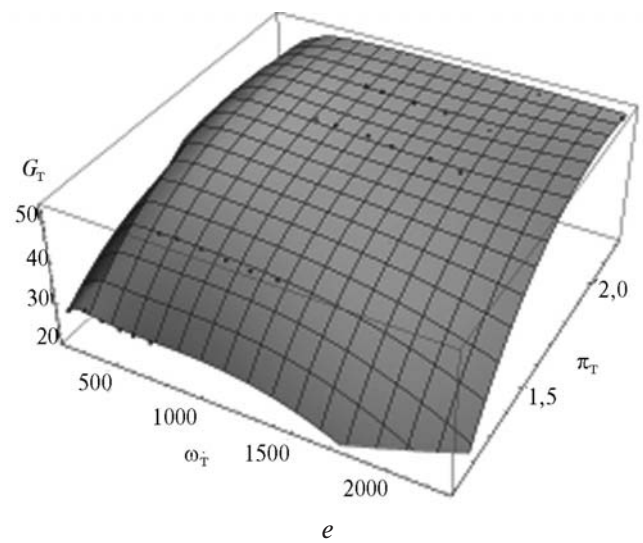
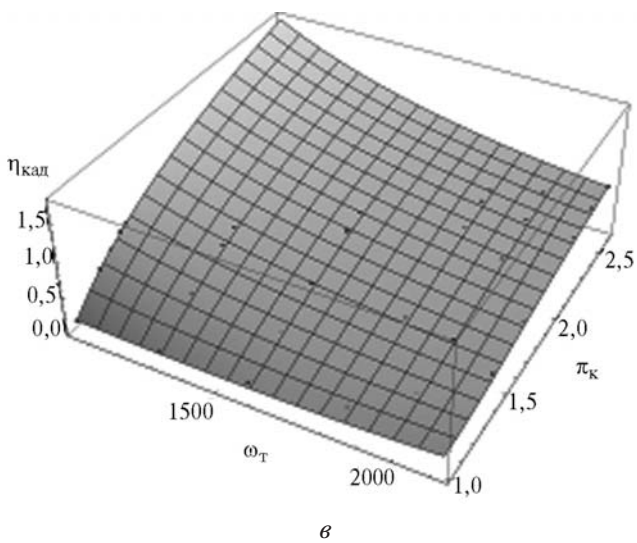
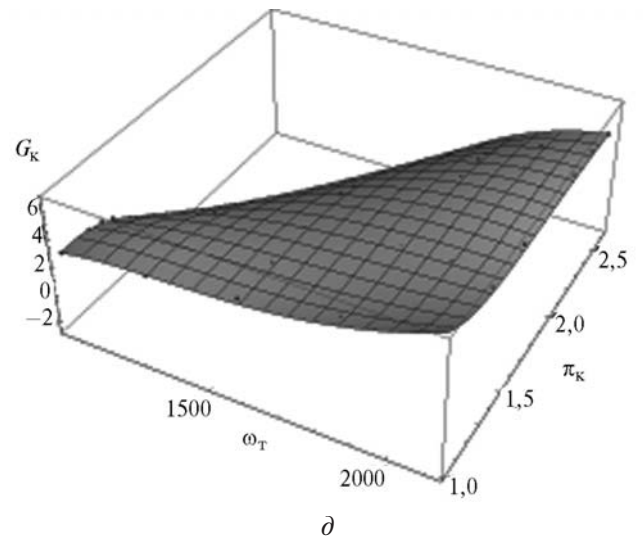
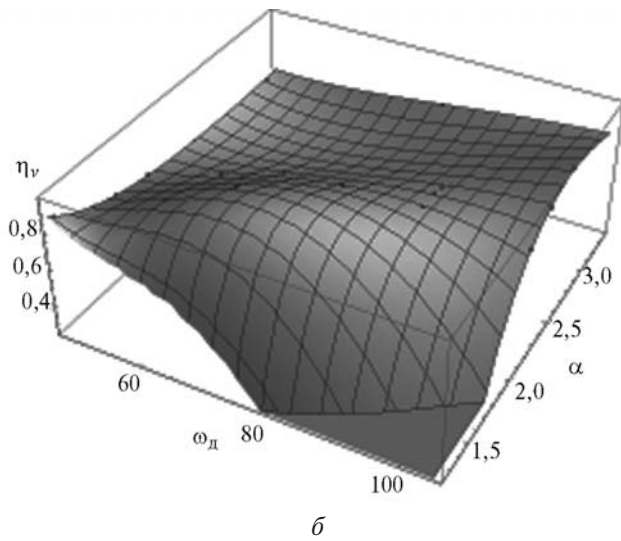
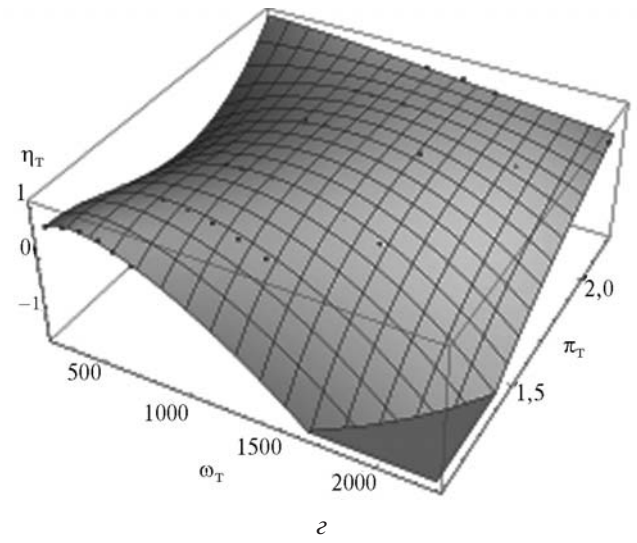
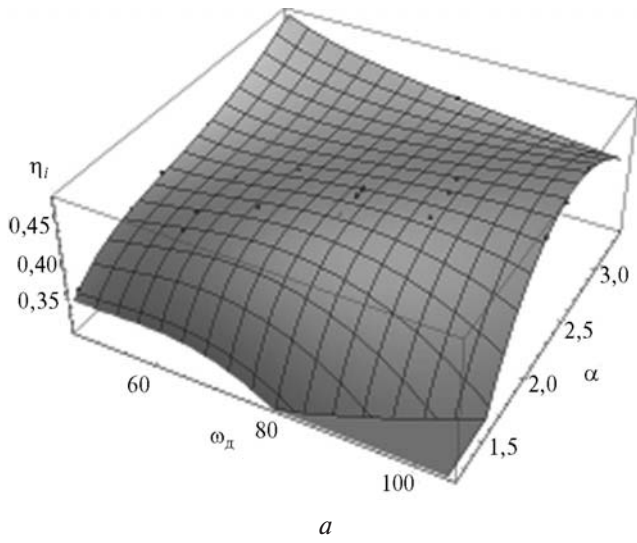


Рисунок. Поверхности полиномов функциональных зависимостей параметров рабочего процесса дизеля:
a – $\eta_i(\omega_d, \alpha)$; *б* – $\eta_v(\omega_d, \alpha)$; *в* – $\eta_{\text{кал}}(\omega_T, \pi_k)$; *z* – $\eta_T(\omega_T, \pi_T)$; *д* – $G_k(\omega_T, \pi_k)$; *e* – $G_T(\omega_T, \pi_T)$

цесса. Для использования могут быть приняты только такие полиномы, для которых резкие изменения параметров находятся вне зоны возможных значений этих параметров, соответствующих динамическим режимам переходных процессов дизеля.

Полиномы, описывающие связи между параметрами рабочего процесса, получены для динамической модели тепловозного дизеля 16ЧН26/26. В качестве примера на рисунке представлены поверхности для следующих полиномов, описывающих функциональные зависимости между параметрами рабочего процесса: $\eta_i(\omega_d, \alpha)$, $\eta_v(\omega_d, p_k)$, $\eta_{к.ад}(\omega_t, \pi_k)$, $\eta_t(\omega_t, \pi_t)$, $G_k(\omega_t, \pi_t)$, $G_t(\omega_t, \pi_t)$. На поверхности нанесены точки исходных данных. На рисунке видно, что достигается достаточно точное соответствие поверхностей полиномов

исходным данным в реальной области изменения параметров рабочего процесса дизеля.

Накопленный автором опыт дает возможность описывать подобным образом связи между параметрами рабочего процесса, необходимые для создания динамических моделей и других дизелей.

Литература

1. Кузнецов А.Г. Динамическая модель комбинированного дизеля// Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 11. С. 39–43
2. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
3. Харде В. Прикладная непараметрическая регрессия; Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 349 с.
4. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере/ Под ред. В.Э. Фигурнова. М.: ИНФРА, М. 2003. 544 с.

Статья поступила в редакцию 17.10.2011