

## ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB MBC TOOLBOX ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шолохова И.И.<sup>1</sup>, Сарсикеев Е.Ж.<sup>1,2</sup>, Молдованова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия, e-mail: sholii@tpu.ru;

<sup>2</sup> Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан, e-mail: sarsikeev@tpu.ru

---

Статья посвящена использованию математического пакета MBC TOOLBOX — программного продукта MATLAB — с целью выбора оптимальной математической модели дизельного двигателя в составе автономной электростанции на основе экспериментальных данных. Проведены выбор, калибровка и оценка погрешности математической модели энергетических характеристик, что позволило определить ее оптимальный вариант согласно принятому критерию оптимизации. Полученная математическая модель экспортирована в программную среду Simulink для исследования режимов работы дизельного двигателя с погрешностью не более 0,1%, что позволяет достоверно и адекватно воспроизводить рабочие характеристики исследуемого объекта. Построенная модель может быть использована для поиска и разработки эффективных алгоритмов и контроля условий эксплуатации дизельного двигателя с переменной скоростью вращения.

---

Ключевые слова: дизельные электростанции, дизельный двигатель, переменная частота вращения, математическое моделирование

## MODELING OF DIESEL ENGINE PARAMETERS WITH MATLAB MBC TOOLBOX

Sholokhova I.I.<sup>1</sup>, E Sarsikeev E.Z.<sup>1,2</sup>, Moldovanova E.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk 634050 Russia, e-mail: sholii@tpu.ru;

<sup>2</sup> S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, 62 Prospect Pobedy, Astana Kazakhstan, e-mail: sarsikeev@tpu.ru

---

The paper describes the use of the MBC TOOLBOX package of MatLab software product for selection of an optimal mathematical model of a diesel engine, as a part of a local power station, on the basis of experimental data. A mathematical model for power parameters has been selected and calibrated; its error has been assessed. This allows an optimal version of the model to be found according to the optimization criterion accepted. The diesel engine model developed is exported into Simulink environment, where the operating conditions of a diesel engine are studied with an error of no higher than 0.1%. This allows reliable and adequate simulation of the operating parameters of the object under study. The model developed can be used for search and development of effective algorithms and control of operating conditions of a variable-speed diesel engine.

---

Keywords: diesel power station, variable-speed diesel engine, mathematical modeling

В настоящее время дизельные электростанции (ДЭС) широко используются в качестве источников основного, резервного или аварийного энергоснабжения различных объектов. Они также подходят для генерации мобильного питания и широко применяются на железных дорогах, подводных лодках и кораблях. Дизельный двигатель, который используется в качестве первичного двигателя для генерирования электрической энергии, является одним из основных компонентов в ДЭС.

Методы математического моделирования и оптимизации широко используются для исследований, направленных на улучшение энергетической и экономической эффективности дизельных электростанций. Актуальность таких исследований увеличивается с возрастающими требованиями экономичности производства электроэнергии и с ужесточением нормативов, ограничивающих выбросы токсинов [2, 3].

В статье описывается алгоритм моделирования дизельного двигателя с переменной скоростью вращения для повышения его энергетической эффективности. Для моделирования рабочих характеристик двигателя внутреннего сгорания применено построение функциональной модели средствами Model-Based Calibration Toolbox™ (MBC Toolbox) с последующим экспортом в среду Simulink (MATLAB). Аппроксимирующая функция имитирует мощность (P) как функцию двух аргументов: скорости вращения вала (n) и абсолютного расхода топлива (g). Программная среда MatLab предлагает много возможностей для создания и проверки модели на адекватность. Пакет MBC Toolbox предназначен для проектирования экспериментов и статистических моделей и калибровки сложных систем. Особенностью процесса калибровки в MBC Toolbox™ является то, что полученный результат – это откалиброванная формула оценки процесса, или функция, предназначенная для подсистем контроля в электронных управляющих устройствах [1, 5]. Кроме того, в процессе моделирования могут быть сглажены ошибки входных данных. В MBC Toolbox используются три вида стратегий: одноуровневые (one-stage), двухуровневые (two-stage) и точечные (point-by-point). В работе рассматривается одноуровневая стратегия, которая предназначена для выявления и разработки отношения между переменными в сложных системах с несколькими переменными. Использование инструментальных средств разработки экспериментов и статистических моделей обусловлено тем, что экспериментальное определение характеристик двигателя внутреннего сгорания требует существенных затрат, и эти характеристики не являются обязательными при разработке новых двигателей, поэтому их определение не входит в планы разработчиков и производителей.

Алгоритм моделирования дизельного двигателя

### 1. Выбор модели

В качестве исходных данных моделирования использованы характеристики дизельного двигателя KM2V80 (табл. 1) [4]. Так как целью исследования не является изменение конструктивного исполнения дизельного двигателя, он может быть представлен в виде простой функциональной модели по типу «черного ящика».

**Таблица 1**

Экспериментальные данные дизеля KM2V80

P, кВт	n, об/мин	g, г/кВт·ч	P, кВт	n, об/мин	g, г/кВт·ч	P, кВт	n, об/мин	g, г/кВт·ч
2,861	3260,4	457,241	2,856	2553	350,867	7,698	1901,4	212,187
3,404	3250,2	406,949	3,370	2552,4	327,563	8,022	1888,2	214,786
4,548	3239,4	355,043	4,416	2529	293,501	2,660	1775,4	227,490
6,443	3196,8	304,564	5,922	2491,2	266,584	3,493	1745,4	221,638
7,642	3178,8	280,121	7,277	2470,8	248,925	4,126	1722	220,201
9,713	3150,6	255,215	9,058	2437,8	231,09	4,676	1706,4	221,333
9,985	3140,4	254,975	12,054	2408,4	215,077	5,279	1674	222,092

12,282	3114,6	225,564	12,675	2392,2	218,586	6,095	1651,2	210,752
2,856	3038,4	398,97	2,852	2299,8	296,656	6,665	1639,8	211,981
3,384	3034,2	367,852	3,351	2292,6	282,007	7,022	1625,4	214,049
4,439	3006,6	329,802	4,343	2266,2	262,374	2,589	1527	186,5864
6,125	2968,8	290,149	5,738	2239,8	242,600	3,184	1497	204,932
7,454	2951,4	266,964	6,750	2221,2	228,751	3,993	1450,8	206,914
9,611	2921,4	245,015	7,979	2191,2	217,280	4,892	1384,8	204,122
12,967	2875,2	220,124	9,490	2158,2	214,220	5,542	1348,2	205,603
2,852	2818,8	375,283	10,085	2142	212,276	2,51587	1260	148,580
3,383	2793	345,177	2,760	2037,6	250,263	2,885	1219,8	168,560
4,399	2763	316,450	3,151	2020,8	241,056	3,374	1177,8	182,052
5,960	2734,8	278,890	3,844	2001,6	238,675	3,886	1131	188,858
7,369	2712	259,103	4,818	1977,6	230,888	4,212	1079,4	196,173
9,294	2683,8	237,551	5,560	1960,2	221,917			
12,020	2638,2	221,798	6,499	1934,4	220,701			

Функциональная модель (кибернетическая) – это математическая модель, устанавливающая взаимно однозначное соответствие между входными и выходными воздействиями объекта (системы) без отображения происходящих внутри процессов. Функциональные модели просты по структуре, строятся экспериментальными методами и позволяют получить достоверные результаты при минимальных временных и экономических затратах.

Функциональная модель дизеля формируется по его фактической нагрузочно-скоростной характеристике, которая устанавливает зависимость его эффективной мощности  $P$  от скорости вращения вала  $n$  и абсолютного расхода топлива  $g$  (рис. 1).

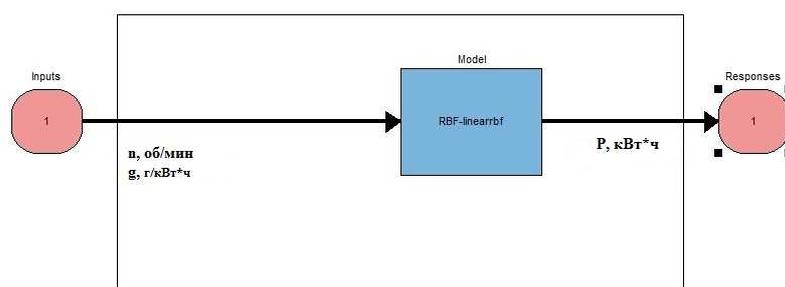


Рис. 1. Процесс создания модели

Для создания оптимальной математической модели использован одноступенчатый план проведения испытаний и интерполяция радиальной базисной функцией (Radial Basic Function). Радиальная базисная функция (RBF) имеет вид:

$$f(\mathbf{x}) = \varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c\|),$$

где  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{x}_c$  – это  $n$ -мерные векторы,  $\|\cdot\|$  обозначает евклидову норму. Вектор  $\mathbf{x}_c$  называется центром радиальной базисной функции. В MVS Toolbox используется линейная комбинация  $N$  радиальных базисных функций с  $N$  различными центрами:

$$\hat{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^r \beta_i z_i(\mathbf{x}),$$

где  $\beta_i$  – вес, соответствующий радиальной базисной функции  $z_i = \varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)$  с центром  $\mathbf{x}_i$ .

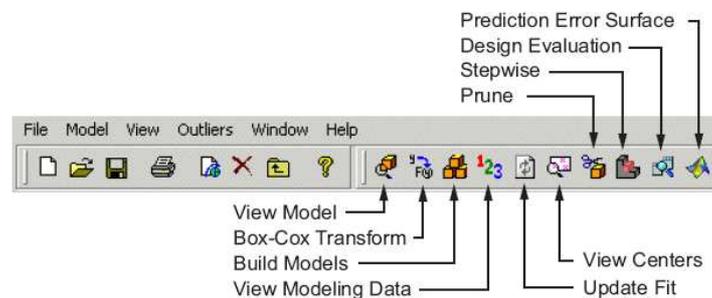
Различные типы RBF представлены в таблице 2.

**Таблица 2**

Виды RBF-функций

Название	Формула
линейная	$\varphi(r) = -r$
Гауссиан	$\varphi(r) = \exp(-r^2 / \sigma^2)$
мультиквадрик	$\varphi(r) = (r^2 + \sigma^2)^{1/2}$
обратный мультиквадрик	$\varphi(r) = (r^2 + \sigma^2)^{-1/2}$
Функции Вендланда с компактным носителем	$\varphi_{3,0}(r) = (1-r)_+^2$
	$\varphi_{3,1}(r) = (1-r)_+^4(4r+1)$
	$\varphi_{3,2}(r) = (1-r)_+^6(35r^2+18r+3)$
	$\varphi_{3,3}(r) = (1-r)_+^8(32r^3+25r^2+8r+1)$
кубическая	$\varphi(r) = r^3$

В процессе моделирования необходимо задать четыре параметра RBF-функции: вес, центры, ширину и  $\lambda$ . Каждый из них может оказывать значительное влияние на качество результата. Опции View Model, Stepwise и View Centers используются для установки ширины, веса и центров (рис. 2) соответственно. Начальное значение  $\lambda$  выбирается между – 3 и 3.



*Рис. 2. Панель инструментов MVS Toolbox*

## 2. Калибровка модели

Качество модели оценивается достоверностью и статистическими характеристиками результатов, полученных в процессе проведения модельных экспериментов.

Опция Stepwise предлагает несколько алгоритмов, таких как Minimize Press, Forward Selection, Backwards Selection и Prune, для уточнения модели и удаления менее полезных элементов (терм). Алгоритм Minimize Press позволяет минимизировать прогнозируемую сумму квадратов ошибок (PRESS). На каждом шаге можно наблюдать, как удаление или добавление элементов влияет на PRESS-статистику. Эта статистика является мерой прогнозируемого качества модели. Поскольку программа предлагает несколько моделей с близкими по значению PRESS-статистики, то возникает необходимость использования дополнительных критериев отбора для выбранных моделей. Forward Selection добавляет все элементы, которые являются статистически значимыми для данной модели. Backwards Selection, напротив, удаляет все статистически не значимые элементы модели. Prune является альтернативным алгоритмом, нацеленным на улучшение качества модели; в отличие от вышеописанных алгоритмов он удаляет и добавляет элементы в заданном порядке. При этом в первую очередь выбираются наиболее важные элементы для улучшения качества модели.

Следующим этапом улучшения качества модели является применение преобразования Box-Cox Transform. Это преобразование приводит экспериментальные данные к нормальному закону распределения. Для последовательности данных  $y_1, y_2, \dots, y_n$  преобразование Box-Cox определяется формулой:

$$y_i^\lambda = \begin{cases} \frac{y_i^\lambda - 1}{\lambda y_i^{\lambda-1}}, & \text{если } \lambda \neq 0, \\ y_i \ln(y_i), & \text{если } \lambda = 0, \end{cases}$$

где  $\lambda$  – параметр, минимизирующий значение суммы квадратов ошибок (SSE) и подобранный по методу максимального правдоподобия. На рисунке 3 показан график зависимости SSE от параметра  $\lambda$ . По умолчанию параметр  $\lambda$  принимает значение от  $-3$  до  $3$  с шагом  $0,5$ . Зеленая точка соответствует минимальному значению  $SSE(\lambda)$ . Красной линией показан 95%-ный доверительный интервал для  $\lambda$ . В качестве текущего значения  $\lambda$  (красная точка) следует выбирать ближайшее значение к минимуму SSE из доверительного интервала.

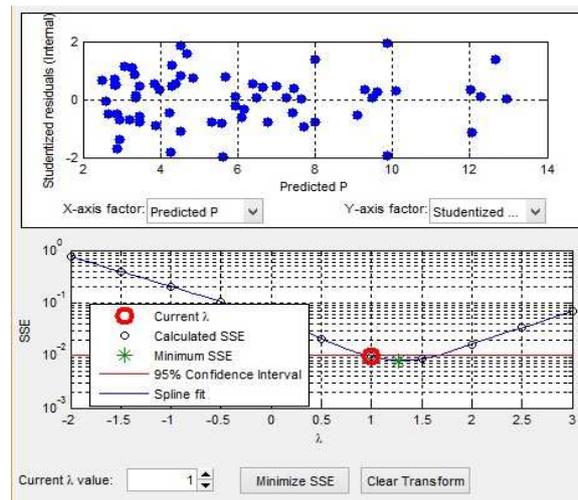


Рис. 3. Окно преобразования *Box-Cox*

### 3. Оценка погрешности

При построении линейных моделей и моделей с использованием RBF-функций доступна опция Prediction Error Variance Viewer, предназначенная для исследования прогнозной способности модели. Prediction Error Variance (PEV) – прогнозируемая дисперсия ошибок – является мерой точности модельных прогнозов. PEV может использоваться для проверки как расчетов, так и моделей.

Таким образом, точность модельных прогнозов зависит от расчета PEV и среднеквадратической ошибки данных. Необходимо попытаться сделать PEV для расчетов настолько низкой, насколько это возможно. Низкое значение (близкое к нулю) означает, что получен хороший прогноз для рассматриваемой точки. Если в результате расчета получается  $PEV < 1$ , тогда ошибки сокращены в процессе настройки модели. Если же получается  $PEV > 1$ , это означает, что любые ошибки в измерениях накапливаются. На рисунке 4 показан 3-D график поверхности ошибок PEV.

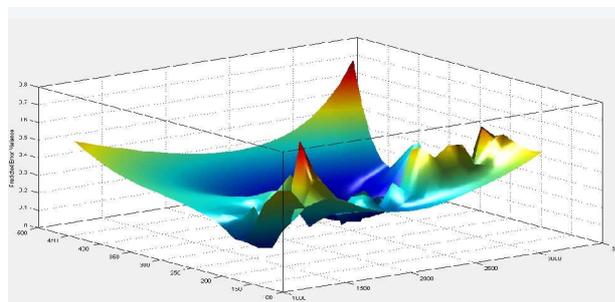


Рис. 4. Поверхность ошибок

После построения моделей программа автоматически составляет список лучших моделей. С учетом этого принята модель *RBF-linearrrbf-29*, выбор которой основан на следующих критериях отбора: *PRESS RMSE*, *RMSE*, *Box-Cox* (рис. 5).

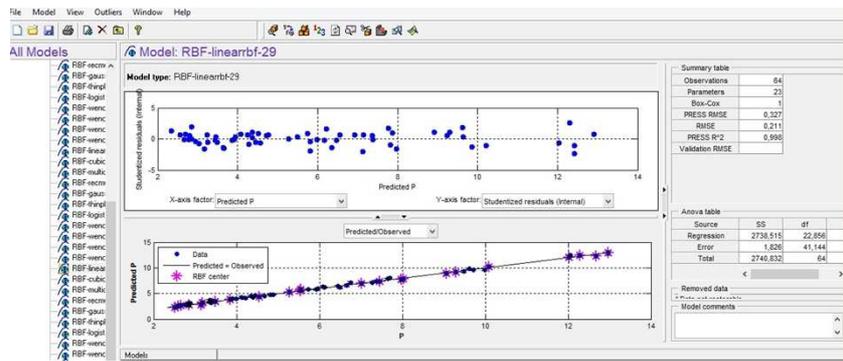


Рис. 5. Модель RBF-linearbf-29

Нижний график, изображенный на рисунке 5, называется Predicted/Observed (Расчетный/Экспериментальный), он дает наглядное представление о точности «подгонки» исходных данных к выбранному шаблону модели в зависимости от входной переменной величины ( $g$ ). Данное представление подтверждает адекватность принятой модели.

#### 4. Заключение

В ходе моделирования рассмотрены различные методы интерполяции и аппроксимации экспериментальных данных. Окончательная модель выбрана на основе оценки моделирования ошибки с выбором различных критериев оптимизации. Компьютерная модель дизельного двигателя, полученная в результате экспорта выбранной функции в Simulink, позволяет исследовать режимы работы на основе экспериментальных данных. Результаты адекватности выбора модели представлены в таблице 3.

Таблица 3

Выборочные исходные данные и результаты в среде Simulink

Исходные данные			Данные, полученные в среде Simulink	
n, об/мин	g, г/кВт·ч	P, кВт	P, кВт	PEV
3260,4	457,2413	2,86	2,799	0,0329
3250,2	406,9499	3,40	3,437	0,0086
3038,4	398,97	2,85	2,94	0,006
2818,8	375,2836	2,85	2,84	0,0037
3034,2	367,8528	3,38	3,48	0,0067
3239,4	355,0439	4,54	4,37	0,019
2553	350,8672	2,86	2,706	0,0029
2793	345,1776	3,38	3,436	0,003
3006,6	329,8022	4,44	4,566	0,0049
2552,4	327,5636	3,37	3,23	0,0028
2763	316,450	4,4	4,258	0,003
3196,8	304,564	6,44	6,477	0,005
2299,8	296,656	2,85	3,177	0,004
2529	293,501	4,42	4,366	0,003
2968,8	290,149	6,13	6,172	0,007
2292,6	282,007	3,35	3,653	0,004
3178,8	280,121	7,64	7,913	0,005

2734,8	278,890	5,96	5,99	0,005
2951,4	266,964	7,45	7,372	0,017

Отличительной особенностью этого метода моделирования является возможность изучать широкий спектр условий эксплуатации с минимальной погрешностью, не превышающей одного процента по отношению к экспериментальным данным.

### Список литературы

1. Дьяконов В.П. SIMULINK 5/6/7 — Самоучитель; М., 2008. – 781 с.
2. Крылов В.Н. Анализ состава выхлопных газов дизельного двигателя [Электронный ресурс] / В.Н. Крылов; науч. рук. Е.Ж. Сарсикеев // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15–9 апреля 2013 г. В 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . – 2013. – Т. 1. – С. 58–59.
3. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 80–82.
4. Шолохова И.И., Сарсикеев Е.Ж. Моделирование рабочих характеристик дизельного двигателя с переменной частотой вращения // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы V Международной научно-практической конференции (Саратов, 19–22 мая 2014 г.). – Саратов: Буква, 2014. – С. 347–351.
5. Matlab-Model-Based-Calibration-Toolbox [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.manualslib.com/manual/392828/Matlab-Model-Based-Calibration-Toolbox-4-Model-Browser.html?page=5#manual> (дата обращения 27.09.2015).

### Рецензенты:

Литвак В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Атомные и тепловые электростанции», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Кабышев А.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.