

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОСТОГО ХОДА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Шайда В.П.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра электрических машин
тел. (0572) 70-76-577, E-mail: vito@kpi.kharkov.ua

Дубинина О.Н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра компьютерной математики и математического моделирования
тел. (0572) 70-76-558

Отримана та оцінена статистичними методами поліноміальна теоретична залежність характеристики холостого ходу двигуна постійного струму.

Получена и оценена статистическими методами полиномиальная теоретическая зависимость характеристики холостого хода двигателя постоянного тока.

ВВЕДЕНИЕ

Задача предварительной обработки результатов измерений или наблюдений наиболее часто встречается при проведении различного рода исследований. Ее решение необходимо, для того чтобы в дальнейшем с наибольшей эффективностью, а главное – корректно, использовать полученные данные для построения эмпирических зависимостей с помощью статистических методов [3, 7]. Особенно эта задача актуальна при исследовании опытных образцов электрических машин, когда сначала необходимо оценить погрешность экспериментально полученных характеристик (данных), установить теоретическую зависимость и затем сравнить с расчетными данными.

В статье рассматривается решение задачи регрессионного анализа на примере экспериментально полученной характеристики холостого хода электродвигателя постоянного тока.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении приемочных испытаний опытного образца двигателя постоянного тока (ДПТ), а также при типовых испытаниях обязательно определяется характеристика холостого хода.

Как известно из [5, 6], характеристикой холостого хода называется зависимость ЭДС E от тока возбуждения I_B при постоянной частоте вращения n и отсутствии нагрузки, т.е. тока в якоре. Она позволяет судить о степени насыщения магнитной системы ДПТ, а степень насыщения оказывает значительное влияние на рабочие свойства ДПТ. Кроме того, характеристика холостого хода позволяет проверить соответствие расчетных данных экспериментальным. Рассмотрим методику определения характеристики холостого хода ДПТ.

В соответствии с ГОСТ 10159 [2] характеристику холостого хода машины постоянного тока (МПТ) определяют при независимом возбуждении или при са-

мовозбуждении, т.к. нами исследуется двигатель независимого возбуждения, принимаем первый вариант. Испытываемый ДПТ должен приводиться во вращение посторонним двигателем с постоянной частотой вращения.

Для определения характеристики холостого хода предлагаются два метода, наиболее часто используется второй, который заключается в измерении восходящей и нисходящей ветвей характеристики. При этом на обмотку возбуждения подают максимальный ток возбуждения и затем плавно уменьшают его до нуля, а затем до такого же максимального значения, но обратной полярности. Затем все повторяют – но увеличивая ток и возвращаясь в исходную (начальную) точку. В результате нисходящая и восходящая ветви образуют гистерезисную петлю, которая проходит через все четыре квадранта Декартовой системы координат. При этом характеристикой холостого хода считается кривая, которая является средним арифметическим абсцисс измеренных восходящей и нисходящей ветвей характеристики [1, 2].

На практике, на предприятиях производящих МПТ, восходящая и нисходящая ветви снимаются только в первом квадранте, т.к. необходимость в полной кривой возникает лишь для специальных машин (электромашинных усилителей и др.). В ходе испытаний измеряют значение ЭДС при одних и тех же значениях тока возбуждения, как для восходящей, так и нисходящей ветвей характеристики. Естественно, что за расчетную кривую холостого хода принимают среднюю линию, но в ней не абсциссы, а ординаты являются средним арифметическим ординат измеренных восходящей и нисходящей ветвей характеристики. Подобная методика определения характеристики холостого хода апробирована и подтверждена более чем 40-летней практикой ОАО "Электромашина", ведущего украинского производителя МПТ.

ПРОВЕДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исследуемого двигателя был выбран образец ДПТ типа 5ПБ112МУХЛ4, з.з.416027, з.н. 3М 50342 производства ОАО "Электромашина" (г. Харьков) со следующими параметрами: 2,2 кВт; 1500 об/мин.; 220 В; возбуждение независимое - 220 В [8]. Внешний вид двигателя показан на рис. 1.

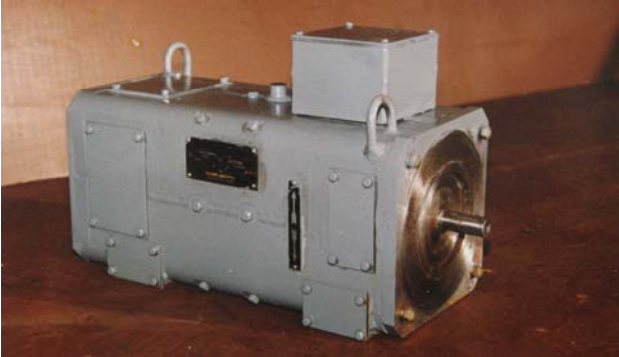


Рис. 1. Двигатель постоянного тока 5ПБ112МУХЛ4

Снятие кривых холостого хода для исследуемого ДПТ проводилось на испытательной станции СКБ ОАО "Электромашина" (г. Харьков). При определении характеристики холостого хода использовались измерительные приборы с классом точности не ниже 0,5. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Характеристика холостого хода при $n = 1500$ об/мин.

Восходящая ветвь характеристики								
$E, В$	10,1	41,72	85,7	127,7	167,7	205	230	250,3
$I_B, А$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Нисходящая ветвь характеристики								
$E, В$	250,3	235	212	175,5	133,7	89,7	45,91	10,1
$I_B, А$	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Снятые кривые – восходящая и нисходящая ветви характеристики, а также расчетная характеристика холостого хода ДПТ показаны на рис. 2.

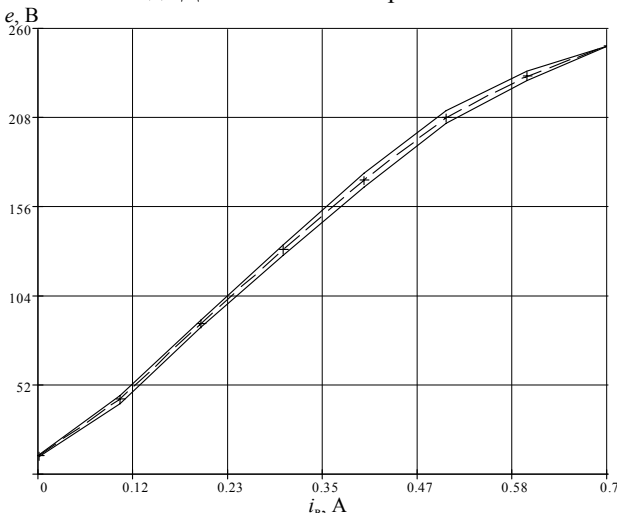


Рис. 2. Экспериментально снятые кривые и расчетная характеристика холостого хода ДПТ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении испытаний, целью которых было получение характеристики холостого хода ДПТ,

неизбежны погрешности измерения. Поэтому возникает задача – по имеющимся экспериментальным точкам с координатами $(i_b; e)$ наилучшим образом воспроизвести теоретическую зависимость ЭДС E от тока возбуждения I_B . В результате аппроксимирующая линия даст возможность определить ЭДС в промежуточных точках, для которых не проводились измерения E и I_B .

С этой целью построим теоретическую зависимость $y(x) = e(i_b)$ по экспериментальным данным, представленным в табл. 1. и проанализируем ее. Располагая результатами регрессии, получим возможность построения линейной математической модели, позволяющей аппроксимировать экспериментальные данные степенными полиномами различного порядка. В ходе расчетов были получены параметры полиномов второй и третьей степени такие, чтобы функция $E(i_b)$ приближала "облако" исходных точек, заданных векторами $\bar{E} = (e_1, e_2, e_3, \dots, e_m)$ и $\bar{I}_B = (i_{b1}, i_{b2}, i_{b3}, \dots, i_{bm})$ ($m = 8$) с наименьшей среднеквадратичной погрешностью. В нашем случае, использовался метод наименьших квадратов [4].

Покажем формирование теоретической зависимости для полинома второй степени. Теоретическую зависимость будем искать в виде $y(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2$, где k_0, k_1, k_2 – неизвестные параметры. Таким образом, функция регрессии является линейной комбинацией функций $F1(x) = x$ и $F2(x) = x^2$. Причем одна из этих функций нелинейная, что резко расширяет возможности такой аппроксимации.

Мы предполагаем, что существует некоторая зависимость $f(x, k_0, k_1, k_2)$, которая может рассматриваться как приближение к зависимости $y(x)$, чьи точки представлены как $y_j(x_j)$. Таким образом, мы вправе записать: $y_j = f(x_j, k_0, k_1, k_2) + \xi_j$, т.е.

$$\boxed{\text{измерение}} = \boxed{\text{модель}} + \boxed{\text{ошибка}}$$

Здесь ξ_j – независимые случайные величины с нормальным законом распределения, определяющие погрешность значения y_j , так называемый регрессионный остаток. Будем считать их следствием ошибок эксперимента.

Задача регрессии заключается в том, чтобы найти параметры k_0, k_1, k_2 такими, при которых представление $y(x)$ нашей функцией $f(x, k_0, k_1, k_2)$ имело наименьшую среднеквадратичную погрешность. Для этого нужно минимизировать функцию:

$$L(k_0, k_1, k_2) = \sum_{j=1}^m [(f(x_j, k_0, k_1, k_2) - y_j)]^2 =$$

$$= \sum_{j=1}^m [k_0 + k_1x + k_2x^2 - y_j]^2 \rightarrow \min.$$

Параметры регрессии находим из системы:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(k_0, k_1, k_2)}{\partial k_0} = 0, \\ \frac{\partial L(k_0, k_1, k_2)}{\partial k_1} = 0, \\ \frac{\partial L(k_0, k_1, k_2)}{\partial k_2} = 0. \end{cases}$$

Для полинома третьей степени реализация аналогична. В результате расчетов получены аппроксимирующие полиномы:

$$e(i_g) = 23,531 + 439,063i_g + 160,625i_g^2 \text{ и}$$

$$e(i_g) = 9,296 + 325,954i_g + 431,552i_g^2 - 581,629i_g^3,$$

теоретические кривые, которых представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

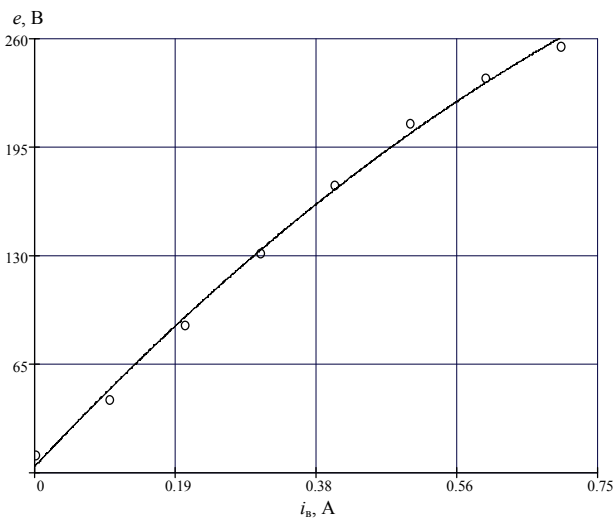


Рис. 3. Экспериментальные точки и график теоретической кривой аппроксимирующего полинома второй степени

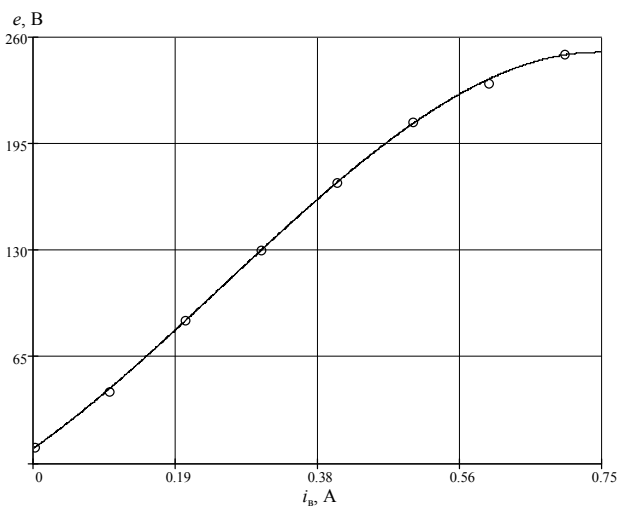


Рис. 4. Экспериментальные точки и график теоретической кривой аппроксимирующего полинома третьей степени

Метод наименьших квадратов, позволяющий определить параметры аппроксимирующей зависимости, связывающей интегрирующие переменные объекта исследования, становятся регрессионным анализом, как только переходят к статистическим оценкам, например, к оценке адекватности.

Для оценки адекватности модели исследуемому явлению определим коэффициент детерминации (R^2), показывающий какая доля изменчивости объясняется моделью, т.е. является не случайной

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \xi_j^2}{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2}, \quad R^2 \in [0; 1], \quad \text{где} \quad \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j.$$

Поскольку в обоих случаях R^2 близко к 1, то обе модели адекватны. Статистика R^2 указывает, что модели обеих кривых объясняют около 99% изменчивости данных. Однако при аппроксимации полиномом третьей степени R^2 ближе к 1, чем при аппроксимации полиномом второй степени. Поэтому качество интерполянта на рис. 4 выше.

ВЫВОДЫ

1. Порядок снятия кривых характеристики холостого хода и механизм определения расчетной характеристики холостого хода на практике и в ГОСТ 10159 [2] отличаются. Адекватность практического подхода подтверждается базовыми работами по теории МПТ [5, 6], поэтому возникает вопрос о необходимости пересмотра отдельных положений ГОСТ 10159, который был разработан еще в 60-е годы прошлого столетия.

2. Для обработки результатов опыта холостого хода и получения теоретической зависимости оказалось целесообразным применить полиномы второй и третьей степени, что подтверждено статистическим анализом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов по спец. "Электромеханика". – М.: Высш. шк., 1990. – 225 с.
- [2] ГОСТ 10159 – 79 Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 10159 – 69; Введен 01.07.80. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 14 с.
- [3] Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: Учеб. Пособие. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат лит., 1987. – 320 с.
- [4] Иглин С.П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB: Учеб. Пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 612 с.
- [5] Кацман М. М. Электрические машины: Учеб. для электротех. средн. спец. зав. 4-е изд. – М.: Высш. шк., 2003. – 469 с.
- [6] Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Логос, Издательско - книготорговый дом, 2002. – 607 с.
- [7] Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
- [8] Протокол № 1015 приемочных испытаний электродвигателя постоянного тока типа 5ПБ112МУХЛ4. – Харьков. 2004. - 9 с.

Поступила 27.12.2007