



УДК 62-523

## **ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ СИНЕГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Клепов А.В., Попов М.Г., Перегудова О.О.*

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск

Синергетические системы – это сложные открытые неравновесные самоорганизующиеся системы, которые способны на внешнее воздействие отвечать самоорганизацией структур. Несмотря на большое количество синергетических систем, мы остановимся на гидравлических, так как гидравлический привод объединяет в себе различные процессы, такие как тепловые, электрические, энергетические и, конечно же магнитные. В работах многих авторов показана связь большинства характеристик электромагнитов с динамической характеристикой намагничивания (ДХН). Данная характеристика может быть получена путем использования в качестве первичного измерительного преобразователя рабочей обмотки электромагнита. ДХН является отражением траектории движения рабочей точки любого электромагнита, что доказывает тесную взаимосвязь ДХН с электротехническими параметрами электромагнита. Характеристики, получаемые при приемо-сдаточных испытаниях, диагностике состояния или исследовательской деятельности зависят от электротехнических параметров ЭП, которые в свою очередь могут быть с достаточно высокой точностью могут быть определены путем анализа ДХН. Так как синергетические системы описываются сложными системами уравнений и большим количеством характеристик и параметров, необходимо снижать размерность данной информации с наименьшими потерями. Сворачивать такие данные можно путём использования нейронных сетей, либо при помощи метода главных компонент. Аппроксимация же необходима для того, чтобы вместо характеристик с большим количеством точек мы получили одну точку в трёхмерном пространстве. Цель курсового проекта – построение регрессионной модели погрешности аппроксимации ДХН. В качестве зависимой переменной берём максимальную общую погрешность, в качестве независимых – степень полинома и количество точек

**Ключевые слова:** синергетические системы, электромагниты, интегральные характеристики, оценка функционального состояния, магнитные измерения

## **CONSTRUCTION OF A REGRESSION ERROR MODEL APPROXIMATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS MAGNETIZATION OF SYNEGETIC SYSTEMS**

*Klepov A.V., Popov M.G., Peregudova O.O.*

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

Synergetic systems are complex open non-equilibrium self-organizing systems that are capable of responding to external influences with self-organization of structures. Despite the large number of synergetic systems, we will focus on hydraulic ones, since a hydraulic drive combines various processes, such as thermal, electric, energy and, of course, magnetic. Many authors have shown the relationship of most characteristics of electromagnets with the dynamic characteristic of magnetization (DCH). This characteristic can be obtained by using an electromagnet as a primary measuring transducer. DHN is a reflection of the trajectory of the working point of any electromagnet, which proves the close relationship of DHN with the electrical parameters of the electromagnet. The characteristics obtained during acceptance tests, condition diagnostics or research activities depend on the electrotechnical parameters of EP, which in turn can be determined with fairly high accuracy by analyzing DCH. Since synergetic systems are described by complex systems of equations and a large number of characteristics and parameters, it is necessary to reduce the dimension of this information with the least loss. You can collapse such data by using neural networks, or using the principal component method. Approximation is necessary so that instead of characteristics with a large number of points we get one point in three-dimensional space. The aim of the course project is to construct a regression model for the approximation error of DHN. As the dependent variable, we take the maximum total error, as independent, the degree of the polynomial and the number of points



**Keywords:** synergetic systems, electromagnets, integrated characteristics, functional state assessment, magnetic measurements

Чтобы провести эксперимент, введём понятие электромагнита. Электромагнитами называются устройства, предназначенные для создания в определенном пространстве магнитного поля с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током [1-7]. Введём понятие динамической характеристики намагничивания (ДХН)  $\Phi = f(I)$ , показанной на рисунке 1. Она отражает изменения магнитного потока в зависимости от силы тока в рабочей обмотке электромагнита в процессе совершения его якорем стандартного рабочего циклического перемещения, восходящая ветвь 0-3 является не чем иным, как фазовой траекторией электромагнита.

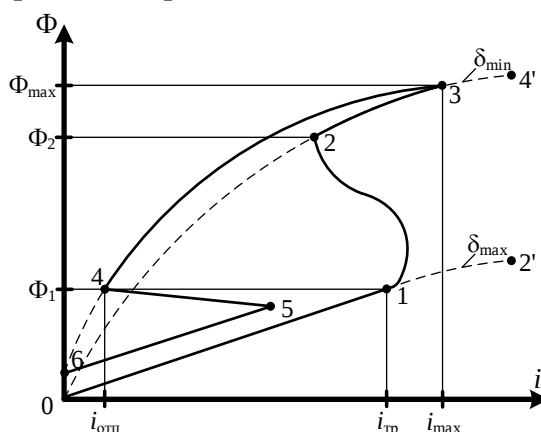


Рис. 1 - Динамическая характеристика намагничивания электромагнита

Рассмотрим применение к ДХН аппроксимации степенным полиномом и кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Метод кусочно-полиномиальной аппроксимации заключается в замене каждого участка 0-1, 1-2, 2-3 ДХН аппроксимирующими кривыми, описываемыми полиномами вида:

$$i(\psi) = \sum_{q=1}^m k_q \psi^q + b$$

где  $k_q$  – коэффициенты, описывающие наклон и изгибы кривой;  $b$  – коэффициент, описывающий смещение кривой относительно оси абсцисс;  $m$  – максимальная степень полинома.

Помимо коэффициентов для построения кусочно-полиномиальной аппроксимации необходимо знать значения тока  $i$  и потокосцепления  $\Psi$  в точках перехода от одного участка ДХН к другому (при этом для описания трех участков необходимо знать по два значения тока и потокосцепления).

Метод аппроксимации степенным полиномом заключается в замене всей ДХН выражением вида:

$$i(\psi) = \sum_{q=1}^m k_q \psi^q$$

Исследования показали, что для описания восходящей ветви ДХН (участки 0-1, 1-2, 2-3) методом кусочно-полиномиальной аппроксимации, требуется девять значений коэффициентов аппроксимирующего полинома и четыре значения, задающие точки соединения участков.



В качестве факторов эксперимента возьмём количество точек  $K$  и степень полинома  $n$ . В качестве отклика берём погрешность аппроксимации  $\delta$ .

Построим план эксперимента, который изобразим на таблице 1

Таблица 1 – План эксперимента.

| $X_1$ | $K$ | $X_2$ | $n$ |                   |
|-------|-----|-------|-----|-------------------|
| +     | 100 | +     | 9   | Ядро эксперимента |
| -     | 10  | +     | 9   |                   |
| +     | 100 | -     | 1   |                   |
| -     | 10  | -     | 1   |                   |
| 0     | 55  | +a    | 9   | Звёздные точки    |
| 0     | 55  | -a    | 1   |                   |
| +a    | 100 | 0     | 5   |                   |
| -a    | 10  | 0     | 5   |                   |
| 0     | 55  | 0     | 5   | Центр плана       |

Для проведения эксперимента была взята ДХН пропорционального электромагнита, состоящая из 4000 точек (рисунок 2).

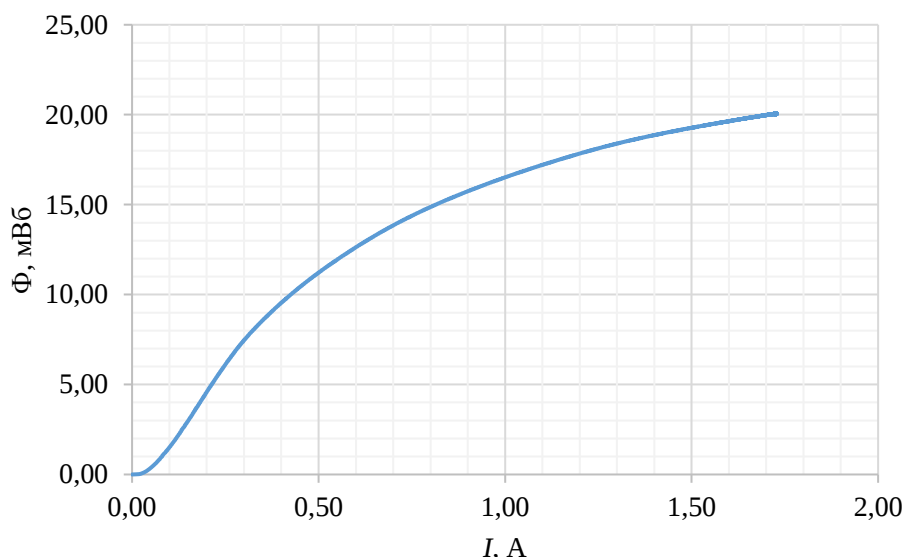


Рис. 2 - ДХН из 4000 точек

Для построения плана эксперимента необходимо получить 9 характеристик со следующими параметрами:

1. ДХН, состоящая из 4000 точек и аппроксимированная полиномом 9 степени.
2. ДХН, состоящая из 2500 точек, аппроксимированная полиномом 9 степени.
3. ДХН, состоящая из 1000 точек, аппроксимированная полиномом 9 степени.
4. ДХН, состоящая из 4000 точек, аппроксимированная полиномом 6 степени.
5. ДХН, состоящая из 2500 точек, аппроксимированная полиномом 6 степени.
6. ДХН, состоящая из 1000 точек, аппроксимированная полиномом 6 степени.
7. ДХН, состоящая из 4000 точек, аппроксимированная полиномом 3 степени.
8. ДХН, состоящая из 2500 точек, аппроксимированная полиномом 3 степени.
9. ДХН, состоящая из 1000 точек, аппроксимированная полиномом 3 степени.



Также введём понятие погрешности аппроксимации и посчитаем её и све-  
дём получившиеся значения в таблице плана эксперимента (таблица 2).

Таблица 2 - План эксперимента с найденными значениями погрешности ап-  
проксимации.

| $X_1$     | $K$  | $X_2$     | $n$ | $\delta, \%$ |
|-----------|------|-----------|-----|--------------|
| +         | 4000 | +         | 9   | 0,152        |
| -         | 1000 | +         | 9   | 0,701        |
| +         | 4000 | -         | 3   | 3,776        |
| -         | 1000 | -         | 3   | 5,696        |
| 0         | 2500 | $+\alpha$ | 9   | 0,438        |
| 0         | 2500 | $-\alpha$ | 3   | 4,912        |
| $+\alpha$ | 4000 | 0         | 6   | 0,564        |
| $-\alpha$ | 1000 | 0         | 6   | 1,586        |
| 0         | 2500 | 0         | 6   | 1,268        |

Планирование эксперимента производится при помощи программной  
среды *Statistica 10*.

Создаём матрицу планирования эксперимента для ПФЭ (рисунок 3).

|   | 1<br>Var1 | 2<br>Var2 | 3<br>Var3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 4000      | 9         | 0,152     |
| 2 | 1000      | 9         | 0,701     |
| 3 | 4000      | 3         | 3,776     |
| 4 | 1000      | 3         | 5,696     |
| 5 | 2500      | 9         | 0,438     |
| 6 | 2500      | 3         | 4,912     |
| 7 | 4000      | 6         | 0,564     |
| 8 | 1000      | 6         | 1,586     |
| 9 | 2500      | 6         | 1,268     |

Рис. 3 - Матрица планирования эксперимента в программе Statistica

Далее вычисляем оценки коэффициентов регрессии, базирующиеся на ко-  
дированных исходных значениях факторов (рисунок 4).

| Effect Estimates; Var.:Var3; R-sqr=.9992; Adj.:.99786 (Spreadsheet8)<br>2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0094834<br>DV: Var3 |          |          |          |          |                   |                   |          |                    |                   |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|----------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Factor                                                                                                                                | Effect   | Std.Err. | t(3)     | p        | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt | Coeff.   | Std.Err.<br>Coeff. | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt |
| Mean/Interc.                                                                                                                          | 1,22389  | 0,072585 | 16,8615  | 0,000454 | 0,99289           | 1,45489           | 1,22389  | 0,072585           | 0,99289           | 1,45489           |
| (1)Var1 (L)                                                                                                                           | -1,16367 | 0,079513 | -14,6350 | 0,000692 | -1,41671          | -0,91062          | -0,58183 | 0,039756           | -0,70836          | -0,45531          |
| Var1 (Q)                                                                                                                              | -0,25367 | 0,137720 | -1,8419  | 0,162730 | -0,69195          | 0,18462           | -0,12683 | 0,068860           | -0,34598          | 0,09231           |
| (2)Var2 (L)                                                                                                                           | -4,36433 | 0,079513 | -54,8885 | 0,000013 | -4,61738          | -4,11129          | -2,18217 | 0,039756           | -2,30869          | -2,05564          |
| Var2 (Q)                                                                                                                              | 2,94633  | 0,137720 | 21,3937  | 0,000223 | 2,50805           | 3,38462           | 1,47317  | 0,068860           | 1,25402           | 1,69231           |
| 1L by 2L                                                                                                                              | 0,68550  | 0,097383 | 7,0392   | 0,005891 | 0,37558           | 0,99542           | 0,34275  | 0,048691           | 0,18779           | 0,49771           |

Рис. 4 - Таблица полученной модели в кодированных значениях

Затем вычисляем оценки коэффициентов регрессии, базирующиеся на  
некодированных (физических) исходных значениях факторов (рисунок 5).



| Regr. Coefficients; Var.:Var3; R-sqr=,9992; Adj:,99786 (Spreadsheet8)<br>2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0094834<br>DV: Var3 |                    |          |          |          |                   |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| Factor                                                                                                                                 | Regressn<br>Coeff. | Std.Err. | t(3)     | p        | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt |
| Mean/Interc.                                                                                                                           | 13,24080           | 0,334556 | 39,5773  | 0,000035 | 12,17609          | 14,30550          |
| (1)Var1 (L)                                                                                                                            | -0,00056           | 0,000168 | -3,3450  | 0,044224 | -0,00110          | -0,00003          |
| Var1 (Q)                                                                                                                               | -0,00000           | 0,000000 | -1,8419  | 0,162730 | -0,00000          | 0,00000           |
| (2)Var2 (L)                                                                                                                            | -2,88203           | 0,096628 | -29,8259 | 0,000083 | -3,18954          | -2,57451          |
| Var2 (Q)                                                                                                                               | 0,16369            | 0,007651 | 21,3937  | 0,000223 | 0,13934           | 0,18803           |
| 1L by 2L                                                                                                                               | 0,00008            | 0,000011 | 7,0392   | 0,005891 | 0,00004           | 0,00011           |

Рис. 5 - Таблица полученной модели в физических значениях

Для проверки гипотезы об адекватности полученной модели используем дисперсионный анализ (рисунок 6).

| ANOVA; Var.:Var3; R-sqr=,9992; Adj:,99786 (Spreadsheet8)<br>2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0094834<br>DV: Var3 |          |    |          |          |          |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----|----------|----------|----------|--|
| Factor                                                                                                                    | SS       | df | MS       | F        | p        |  |
| (1)Var1 (L)                                                                                                               | 2,03118  | 1  | 2,03118  | 214,183  | 0,000692 |  |
| Var1 (Q)                                                                                                                  | 0,03217  | 1  | 0,03217  | 3,393    | 0,162730 |  |
| (2)Var2 (L)                                                                                                               | 28,57111 | 1  | 28,57111 | 3012,750 | 0,000013 |  |
| Var2 (Q)                                                                                                                  | 4,34044  | 1  | 4,34044  | 457,688  | 0,000223 |  |
| 1L by 2L                                                                                                                  | 0,46991  | 1  | 0,46991  | 49,551   | 0,005891 |  |
| Error                                                                                                                     | 0,02845  | 3  | 0,00948  |          |          |  |
| Total SS                                                                                                                  | 35,47326 | 8  |          |          |          |  |

Рис. 6 - Таблица оценки адекватности модели

Уравнение регрессии для кодированных значений факторов имеет вид:

$$Y=1,224-0,582 \cdot X_1-2,182 \cdot X_2+1,473 \cdot X_2^2+0,343 \cdot X_1 \cdot X_2$$

Уравнение регрессии для физических значений факторов имеет вид:

$$\Delta = 13,241-0,001 \cdot K-2,882 \cdot n+0,164 \cdot n^2+0,0001 \cdot K \cdot n$$

На рисунке 7 показана поверхность отклика.

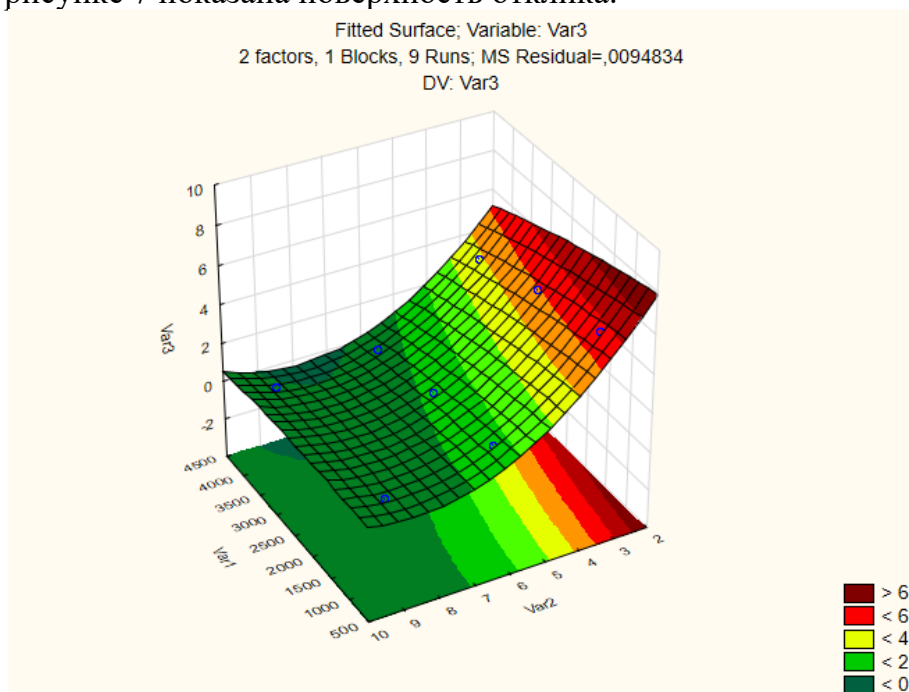


Рис. 7 - Поверхность отклика



Построена регрессионная модель погрешности аппроксимации динамической характеристики намагничивания пропорционального электромагнита. С помощью полного факторного эксперимента построена ОЦКП и выявлено влияние количества точек и степени полинома на погрешность аппроксимации. Модель адекватна, а относительные погрешности коэффициентов не превысили допустимые значения. Можно заключить, что погрешность аппроксимации зависит от количества точек линейно, от степени полинома квадратично, а так же линейно зависит от взаимодействия обоих факторов, что подтверждает построенная модель.

#### Список цитируемой литературы

1. Ланкин А.М., Метод и устройство экспресс-контроля электротехнических параметров для систем управления производством пропорциональных электромагнитов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЮРГПУ (НПИ) им. Платова, Новочеркасск, 2018. - 167 с.
2. Ланкин А.М. Метод натурно-модельного эксперимента в диагностике электромагнитов / Ланкин М.В. // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 28 сент. 2013 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2014. - С. 26-28.
3. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Метод измерения вебер – амперной характеристики базирующийся на решении обратной задачи МГБ // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 4. - URL: <http://www.science-education.ru/118-13942>.
4. Заитов С.И., Полухин А.Ю., Блажко И.О. Программная платформа устройства измерения магнитных параметров электромагнитов // Электронный научный журнал «Вестник молодёжной науки России», №1, 2019. 60 с. – Режим доступа: [https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c\\_15262eb5360e4b57a2c4adef89db0126.pdf](https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c_15262eb5360e4b57a2c4adef89db0126.pdf) (Дата обращения 25.06.2020).
5. Е.С. Гульматова, С.И. Заитов, А.Ю. Полухин, Д.А. Бранчукова, И.О. Блажко, Чернышова Е.Н. Структурная схема устройства измерения вебер-амперных характеристик электротехнический изделий // Электронный научный журнал «Вестник молодёжной науки России», №3, 2019. 66 с. – Режим доступа: [https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c\\_cb16557000e3426ba0d4417fb4ed457e.pdf](https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c_cb16557000e3426ba0d4417fb4ed457e.pdf) (Дата обращения 25.06.2020).
6. Ковылин С.С., Ядыкин Д.В. Обзор и анализ интегральных характеристик для оценки функционального состояния электромагнитов // Электронный научный журнал «Вестник молодёжной науки России», №6, 2019. 13 с. – Режим доступа: [https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c\\_2d1097f2469d4fe5906843a668440bba.pdf](https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c_2d1097f2469d4fe5906843a668440bba.pdf) (Дата обращения 25.06.2020).
7. А.М. Ланкин Анализ методов контроля функционального состояния высоковольтных электромагнитных выключателей // Электронный научный журнал «Вестник молодёжной науки России», №6, 2019. 17 с. – Режим доступа: [https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c\\_478e8ce4d13549e891e8ecb579919bc3.pdf](https://07992ba4-dcc8-4e97-a627-2ff245129607.filesusr.com/ugd/96814c_478e8ce4d13549e891e8ecb579919bc3.pdf) (Дата обращения 25.06.2020).