



УДК 621.317

**ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТИ
АПРОКСИМАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НАМАГНИЧИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

А.М. Ланкин, М.С. Акулов, М.Ю. Ланкина, С. А. Гладких, В.И. Король.

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

В данной статье рассмотрено построение регрессионной модели погрешности аппроксимации динамической характеристики намагничивания сложных синергетических систем. Синергетические системы – это сложные открытые неравновесные самоорганизующиеся системы, которые способны на внешнее воздействие отвечать самоорганизацией структур. Актуальность состоит в том, что синергетические системы описываются большим количеством уравнений, характеристик и параметров, необходимо сжатие данной информации с наименьшими потерями. Аппроксимация необходима для того, чтобы вместо характеристик, описываемых большим количеством точек, мы получили одну точку в трёхмерном пространстве. ДХН является отражением траектории движения рабочей точки любого электромагнитного привода, рассмотренного как сложная синергетическая система, и является наиболее точной и информативной по сравнению с другими характеристиками. Как и при любой аппроксимации возникает погрешность, которую описывает построенная регрессионная модель.

Ключевые слова: динамическая характеристика намагничивания, синергетическая система, погрешность аппроксимации, регрессионная модель.

**CONSTRUCTION OF THE REGRESSION MODEL OF THE ERROR OF
APPROXIMATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF
MAGNETIZATION COMPLEX SYNERGETIC SYSTEMS**

A. M. Lankin, M. S. Akulov, M. Y. Lankina, S.A. Gladkikh, V.I. Korol.

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

This article describes the construction of a regression model of the error of approximation of the dynamic characteristics of the magnetization of complex synergistic systems. Synergetic systems are complex open non-equilibrium self-organizing systems that are capable of responding to external influence by self-organizing structures. The urgency lies in the fact that synergistic systems are described by a large number of equations, characteristics and parameters, it is necessary to compress this information with the least losses. Approximation is necessary so that instead of the characteristics described by a large number of points, we get one point in three-dimensional space. DHN is a reflection of the trajectory of the working point of any electromagnetic drive, considered as a complex synergistic system, and is the most accurate and informative compared to other characteristics. As with any approximation, an error occurs, which is described by the constructed regression model.

Keywords: Dynamic characteristic of magnetization, synergistic system, approximation error, regression model.

Чтобы построить полином, содержащий квадраты факторов требуется каждый фактор варьировать на трех уровнях. Для построения таких планов можно применять трехуровневые планы: $N_3 = 3^k$. Но N_3 всегда больше N_2 и их разница быстро растёт с ростом k , поэтому вместо ПФЭ 3^k используют различные композиционные планы, которые обладают меньшей избыточностью. За основу (ядро) такого плана принимается ПФЭ 2^k или ДФЭ 2^{k-p} . Ядро дополняется звездными точками и точкой в центре плана. Если звездные точки расположены симметрично относительно центра плана, то это ортогональный центрально- композиционный



план (ОЦКП), который мы будем использовать для построения данной регрессионной модели.

Для проведения эксперимента была взята ДХН пропорционального электромагнита, состоящая из 1000 точек (рис. 1).

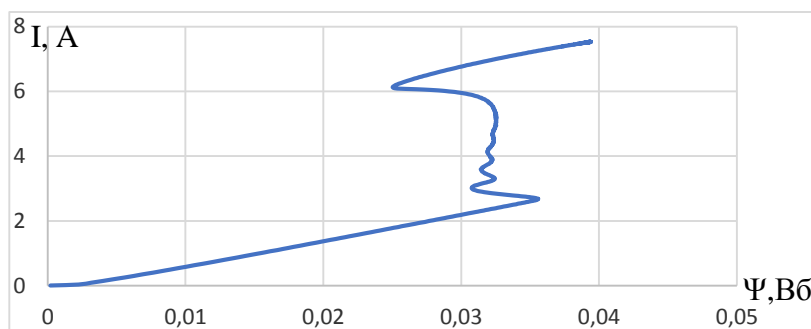


Рис. 1-ДХН из 1000 точек.

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

1. ДХН, состоящая из 100 точек и аппроксимированная полиномом 9 степени
2. ДХН, состоящая из 55 точек, аппроксимированная полиномом 9 степени.
3. ДХН, состоящая из 10 точек, аппроксимированная полиномом 9 степени.
4. ДХН, состоящая из 100 точек, аппроксимированная полиномом 5 степени.
5. ДХН, состоящая из 55 точек, аппроксимированная полиномом 5 степени.
6. ДХН, состоящая из 10 точек, аппроксимированная полиномом 5 степени.
7. ДХН, состоящая из 100 точек, аппроксимированная полиномом 1 степени.
8. ДХН, состоящая из 55 точек, аппроксимированная полиномом 1 степени.
9. ДХН, состоящая из 10 точек, аппроксимированная полиномом 1 степени.

Построим план эксперимента, исходя из полученных данных (табл.1).

Таблица 1 - План эксперимента.

X_1	K	X_2	n	$\gamma, \%$
-	10	+	9	19,70392
-	10	+	9	21,280234
-	10	+	9	18,127606
$-\alpha$	10	0	5	19,95096
$-\alpha$	10	0	5	21,547037
$-\alpha$	10	0	5	18,354883
0	55	$+\alpha$	9	7,176281
0	55	$+\alpha$	9	7,7503835
0	55	$+\alpha$	9	6,6021785
+	100	+	9	6,938728
+	100	+	9	7,4938262
+	100	+	9	6,3836298
0	55	0	5	12,70253
0	55	0	5	13,718732
0	55	0	5	11,686328
$+\alpha$	100	0	5	12,47008



Продолжение таблю 1

X_1	K	X_2	n	$\gamma, \%$
$+\alpha$	100	0	5	13,467686
$+\alpha$	100	0	5	11,472474
-	10	-	1	37,80808
-	10	-	1	40,832726

Входными параметрами будем считать количество точек и степень полинома, выходным параметром является погрешность аппроксимации.

Планирование эксперимента производится при помощи программной среды *Statistica 10*. *Statistica 10* – это интегрированная система анализа и управления данными. Это инструмент разработки пользовательских приложений в бизнесе, экономике, финансах, промышленности, медицине, страховании и других областях.

Создаём матрицу планирования эксперимента для ПФЭ (рис.2).

	1 Var1	2 Var2	3 Var3
1	10	9	19.70392
2	10	9	21.28023
3	10	9	18.12761
4	10	5	19.95096
5	10	5	21.54704
6	10	5	18.35488
7	55	9	7.176281
8	55	9	7.750383
9	55	9	6.602179
10	100	9	6.938728
11	100	9	7.493826
12	100	9	6.38363
13	55	5	12.70253
14	55	5	13.71873
15	55	5	11.68633
16	100	5	12.47008
17	100	5	13.46769
18	100	5	11.47247
19	10	1	37.80808
20	10	1	40.83273
21	10	1	34.78343
22	55	1	37.10587
23	55	1	40.07434
24	55	1	34.1374
25	100	1	36.86322
26	100	1	39.81228
27	100	1	33.91416

Рис. 2- Матрица планирования эксперимента в программе *Statistica 10*

Далее вычисляем оценки коэффициентов регрессии, базирующиеся на кодированных исходных значениях факторов (рис.3).



Effect Estimates; Var.:Var3; R-sqr=,97425; Adj.:96812 (Spreadsheet2) 2 factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Pure Error=3,817231 DV: Var3										
Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(18)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	12,8450	0,840770	15,2777	0,000000	11,0786	14,6114	12,8450	0,840770	11,0786	14,6114
(1)Var1 (L)	-7,0636	0,921018	-7,6694	0,000000	-8,9986	-5,1287	-3,5318	0,460509	-4,4993	-2,5643
Var1 (Q)	6,5885	1,595249	4,1301	0,000629	3,2370	9,9400	3,2943	0,797625	1,6185	4,9700
(2)Var2 (L)	-25,9861	0,921018	-28,2145	0,000000	-27,9211	-24,0511	-12,9930	0,460509	-13,9605	-12,0255
Var2 (Q)	18,4497	1,595249	11,5654	0,000000	15,0982	21,8011	9,2248	0,797625	7,5491	10,9006
1L by 2L	-5,9102	1,128012	-5,2395	0,000055	-8,2800	-3,5403	-2,9551	0,564006	-4,1400	-1,7702

Рис. 3-Таблица полученной модели в кодированных значениях

Затем вычисляем оценки коэффициентов регрессии, базирующиеся на некодированных (физических) исходных значениях факторов (рис. 4).

Regr. Coefficients; Var.:Var3; R-sqr=,97425; Adj.:96812 (Spreadsheet2) 2 factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Pure Error=3,817231 DV: Var3						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err. Pure Err	t(18)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	48,22313	1,574124	30,6349	0,000000	44,91602	51,53025
(1)Var1 (L)	-0,17535	0,047196	-3,7153	0,001584	-0,27450	-0,07619
Var1 (Q)	0,00163	0,000394	4,1301	0,000629	0,00080	0,00245
(2)Var2 (L)	-8,11083	0,539881	-15,0234	0,000000	-9,24508	-6,97659
Var2 (Q)	0,57655	0,049852	11,5654	0,000000	0,47182	0,68129
1L by 2L	-0,01642	0,003133	-5,2395	0,000055	-0,02300	-0,00983

Рис. 4-Таблица полученной модели в физических значениях

Для проверки гипотезы об адекватности полученной модели используем ANOVA анализ (рис.5).

ANOVA; Var.:Var3; R-sqr=,97425; Adj.:96812 (Spreadsheet2) 2 factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Pure Error=3,817231 DV: Var3					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Var1 (L)	224,528	1	224,528	58,8195	0,000000
Var1 (Q)	65,113	1	65,113	17,0577	0,000629
(2)Var2 (L)	3038,744	1	3038,744	796,0597	0,000000
Var2 (Q)	510,585	1	510,585	133,7578	0,000000
1L by 2L	104,790	1	104,790	27,4519	0,000055
Lack of Fit	35,519	3	11,840	3,1016	0,052708
Pure Error	68,710	18	3,817		
Total SS	4047,989	26			

Рис. 5-Таблица оценки адекватности модели

Уравнение регрессии для кодированных значений факторов имеет вид:

$$Y=12,8450-3,5318 \cdot X_1+3,2943 \cdot X_1^2-12,9930 \cdot X_2+9,2248 \cdot X_2^2-5,9102 \cdot X_1 \cdot X_2$$

Уравнение регрессии для физических значений факторов имеет вид:

$$y=48,22313 -0,17535 \cdot k+0,00163 \cdot k^2-8,1108 \cdot n+0,5765 \cdot n^2-0,0164 \cdot k \cdot n$$

На рисунках 6-8 показаны поверхность отклика в различных положениях пространства.

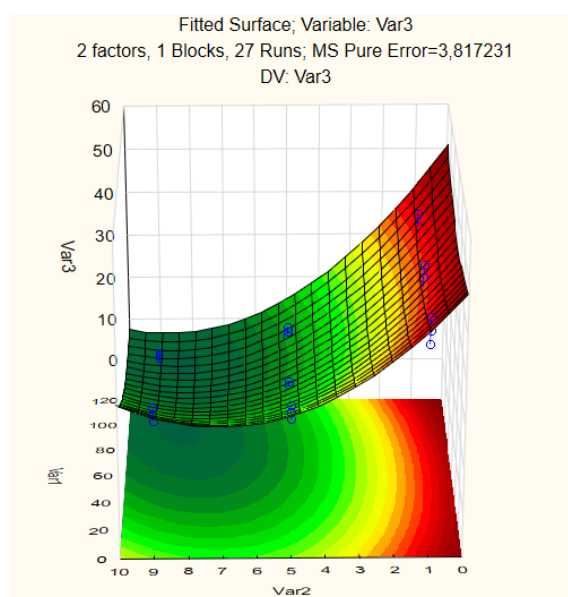


Рис. 6-Поверхность отклика.

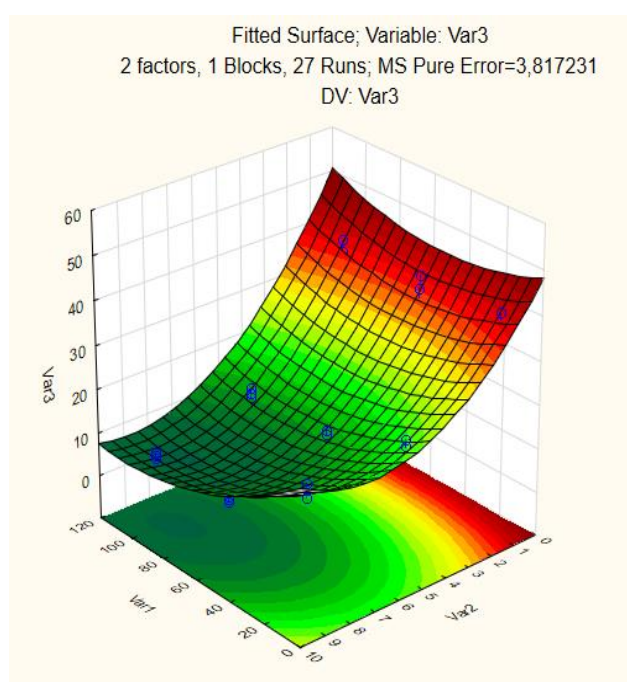


Рис. 7-Поверхность отклика (вид сбоку).

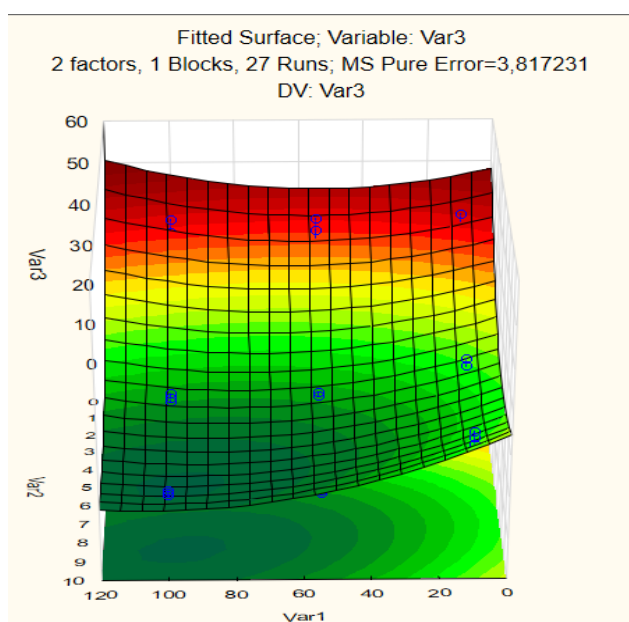


Рис. 8-Поверхность отклика (вид сверху).

Найдем число степеней свободы f_1 и f_2 по формуле:

$$f_1 = N - L = 9 - 6 = 3$$

$$f_2 = N \cdot (m - 1) = 9 \cdot 2 = 18$$

где N -число опытов, L -число значимых коэффициентов уравнения регрессии, m -число повторений опытов.

Пересечение столбца *MS* и строки *Lack of Fit* на рис.2.14 соответствует дисперсии адекватности $S^2_{ад}$. Пересечение столбца *MS* и строки *Pure Error* соответствует дисперсии воспроизводимости $S^2_{вос}$. Для проверки модели на адекватность по формуле найдем расчётный критерий Фишера $F_{рас}$:

$$F_{рас} = S^2_{ад} / S^2_{вос}$$

В результате получаем $F_{рас} = 3,1016$, пользуясь таблицей распределения Фишера найдём $F_{кр}$, которое для степеней свободы $f_1 = 3$ и $f_2 = 18$ равно $F_{кр} = 3,16$, сравниваем значения $F_{рас}$ и $F_{кр}$ и даём заключение о том, что модель адекватна, т.к. $F_{рас} < F_{кр}$.

С помощью полного факторного эксперимента выполнено ОЦКП и была 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 и степени полинома как линейно, так и квадратично, что подтверждает построенная модель