

УДК 681.518

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ОТ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

Гладких С.А., Ланкин А.М., Ланкин М.В., Ткаченко Г.И.

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: youth.science.russia@gmail.com

В статье рассматривается построение регрессионной модели зависимости тяговых характеристик электромагнитов от магнитных характеристик их составных частей. Эта математическая модель может быть применена при производстве электромагнитов для осуществления их комплементарной сборки. Такая сборка основывается на взаимном влиянии магнитных свойств различных деталей внутри общей магнитной системы, из-за чего результирующий эффект на рабочую характеристику собранного электромагнита представляет совокупность влияний отдельных его частей. Предлагается при помощи регрессионной модели подбирать сборочные комплекты электромагнитов, тем самым увеличив число годных электромагнитов с требуемыми рабочими характеристиками. Заодно этот метод уменьшает затраты времени и ресурсов на изготовление, отбраковку и переработку электромагнитов за счет снижения количества брака. Получение рабочих характеристик проводилось с помощью моделирования работы электромагнита в виде двухмерной осесимметричной модели с различными сочетаниями отклонения индукции насыщения деталей. Построение регрессионной модели основано на проведении эксперимента по ортогональному центрально-композиционному плану. В качестве факторов в эксперименте рассматривались отклонения индукции насыщения якоря, корпуса и магнитного шунта электромагнита, как оказывающие влияние на всю магнитную характеристику деталей – основную кривую намагничивания. В качестве отклика использовалась тяговая характеристика электромагнита, преобразованная в пространство главных компонент для сжатия информации и избавления от мультиколлинеарности.

Ключевые слова: электромагнит, комплементарная сборка, главные компоненты, тяговая характеристика, регрессионное уравнение, магнитная система

REGRESSION MODELING OF DEPENDENCE OF THE TRACTION CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETS AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THEIR INTEGRAL PARTS

Gladkikh S.A., Lankin A.M., Lankin M.V., Tkachenko G.I.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk,
e-mail: youth.science.russia@gmail.com

The article discusses the construction of a regression model of the dependence of the traction characteristics of electromagnets on the magnetic characteristics of their components. This mathematical model can be applied in the production of electromagnets for the implementation of their complementary assembly. Such an assembly is based on the mutual influence of the magnetic properties of various parts inside a common magnetic system, which is why the resulting effect on the performance of an assembled electromagnet is a combination of the effects of its individual parts. It is proposed to select assembly sets of electromagnets using a regression model, thereby increasing the number of suitable electromagnets with the required performance characteristics. At the same time, this method reduces the time and resources spent on the manufacture, rejection and processing of electromagnets by reducing the amount of scrap. The performance characteristics were obtained by simulating the operation of an electromagnet in the form of a two-dimensional axisymmetric model with various combinations of deviations of the saturation induction of parts. The construction of the regression model is based on conducting an experiment according to the orthogonal central compositional plan. As factors in the experiment, deviations of the saturation induction of the armature, body, and magnetic shunt of the electromagnet were considered as having an effect on the entire magnetic characteristic of the parts – the main magnetization curve. As a response, the traction characteristic of the electromagnet was used, transformed into the space of the main components to compress information and get rid of multicollinearity.

Keywords: electromagnet, complementary assembly, PCA, traction characteristic, regression equation, magnetic system

Электромагниты постоянного тока находят применение во множестве областей жизни человека. Они используются для управления потоками среды (газовой, жидкой), в качестве замков, в устройствах механического сопряжения (муфтах). В связи с этим они встречаются в водоснабжении, агрокультуре, системах компрессии воздуха (как разгрузочные клапаны), центральном отоплении, автомобильных мойках и за-

правках, непосредственно в автомобиле, в бытовой технике. На работу электромагнита оказывают влияние характеристики, форма и состав его составных частей. Однако экспериментально определить влияние отклонения характеристик отдельных частей электромагнита на его рабочую характеристику трудно- и времязатратно. Чтобы нивелировать этот недостаток, предлагается осуществить моделирование

электромагнита. При помощи модели можно рассмотреть работу электромагнита при различных отклонениях магнитных свойств деталей и определить степень влияния каждой из них в различных сочетаниях.

Рабочий процесс электромагнита основан на преобразовании электрической энергии в механическую и, как результат, в прямолинейное движение. Связывают это преобразование электромагнитные силы, распространяющиеся по структуре электромагнита [1], представленной на рис. 1.

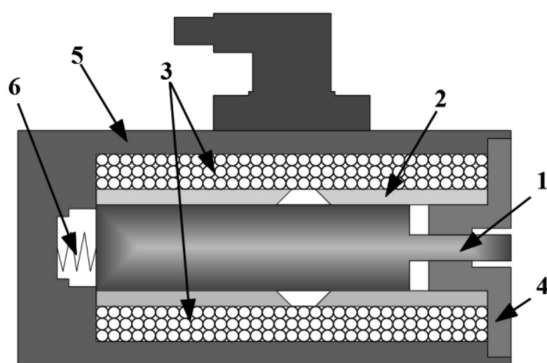


Рис. 1. Техническое устройство электромагнита

В работе электромагнита участвуют: корпус (5), якорь (1), осуществляющий перемещение под действием электромагнитного поля, создаваемого рабочей обмоткой (3), фланца (4) для закрепления элементов внутри корпуса. Для возврата якоря в исходное положение используется пружина (6). Чтобы линеаризовать зависимость перемещения якоря от тока, протекающего через обмотку, между якорем и обмоткой устанавливается магнитный шунт (2), выполненный из магнитомягкого материала с немагнитной вставкой.

Поскольку электромагнит представляет собой структуру из деталей с магнитной проводимостью, то важно рассматривать влияние отклонений магнитных характеристик его составных частей на рабочую характеристику. В качестве характеристики магнитных свойств деталей используют зависимость магнитной индукции и напряженности магнитного поля – $B-H$ кривую [2]. При перемагничивании деталей образуется семейство графиков таких зависимостей, именуемых петлями гистерезиса [3; 4].

При первоначальном увеличении напряженности магнитного поля (и условия, что материал был в размагниченном состоянии) возрастающая индукция образует кривую, которая называется кривой первоначального намагничивания. Если после

того, как напряженность магнитного поля и индукция достигают максимума, начать снижать значение напряженности до нуля, то произойдет уменьшение величины магнитной индукции до некой величины, отличной от нуля. При увеличении напряженности магнитного поля обратной величины произойдет переход через точку коэрцитивной силы, где напряженность равна нулю, и возрастание индукции также с противоположным знаком вплоть до максимальных значений. Эта точка будет симметрична относительно центра координат точке положительных максимальной напряженности и индукции насыщения. Обратный переход напряженности магнитного поля от отрицательных величин к максимальной положительной завершит общий график характеристики материала – предельной петли гистерезиса. Особенность этой петли в том, что внутри ее границ будут находиться все остальные петли гистерезиса этого материала. А через вершины этих петель пройдет кривая, соединяющая начало координат и точку с индукцией насыщения, именуемая основной кривой намагничивания. Изменение геометрических размеров, технологий изготовления деталей [5; 6], состава сплава окажет влияние на эту характеристику. Таким образом, основная кривая намагничивания деталей отражает их суммарные магнитные свойства, что позволяет рассматривать ее как характеристику элементов магнитной системы. Изменения свойств отдельных частей магнитопровода повлекут за собой и изменения рабочих характеристик электромагнитов – в том числе тяговых характеристик электромагнита.

Во время приемо-сдаточных испытаний производят измерения динамических тяговых характеристик. Эти характеристики связывают зависимость электромагнитной силы F_d от изменяющейся в процессе работы величины зазора $F_d = f(\Delta)$ [7].

Для определения влияния магнитных характеристик каждой детали на общую тяговую характеристику электромагнита необходимо построить математическую регрессионную модель.

Цель исследования заключается в получении адекватной регрессионной математической модели, отражающей зависимость тяговой характеристики электромагнита с магнитными параметрами его составных частей. Такая регрессионная модель необходима для решения задачи комплементарной сборки, заключающейся во взаимодополняющем подборе деталей электромагнита по их магнитным свойствам, с целью уменьшить количество брака готовых изделий в процессе их производства [8].

Материалы и методы исследования

Для получения тяговых характеристик применено моделирование электромагнита в программном продукте COMSOL Multiphysics. Построена упрощенная модель на базе двухмерного осесимметричного представления (рис. 2).

В модели рассматривалось влияние отклонения магнитной индукции насыщения материалов трех составляющих частей электромагнита (корпуса, магнитного шунта и якоря) на тяговую характеристику. Построенная модель имитирует работу электромагнита и позволяет получить зависимость между тяговым усилием и зазором в процессе движения якоря под действием электромагнитных сил.

Для проведения эксперимента использовалась методика планирования эксперимента [9]. Составлена матрица планирования, представленная в табл. 1, основанная на ортогональном центрально-композиционном плане (ОЦКП), включающем три фактора (отклонения максимальной индукции насыщения деталей электромагнита). План эксперимента содержит ядро, в виде полного факторного эксперимента, шесть звездных точек, расположенных симметрично относительно центра плана, и центр плана. Были проведены три повторения каждого эксперимента для расчета критерия адекватности полученной модели. В качестве отклика выбрана динамическая тяговая характеристика электромагнита, представленная в виде первой главной компоненты $PC1$ этой ха-

рактеристики. Преобразование динамической характеристики в первую главную компоненту производилось по методике, описанной в [10; 11].

Главногокомпонентный анализ применен с целью сжатия информации и заключается в переходе в ортогональное пространство первой главной компоненты. Поскольку первая главная компонента имела дисперсию более 99,9%, вторая главная компонента не учитывалась в эксперименте. Помимо этого, перевод динамической тяговой характеристики в пространство главных компонент позволяет избавиться от мультиколлинеарности тяговых характеристик и получить адекватную регрессионную модель.

Таким образом, эксперимент проводился с целью получения уравнения взаимосвязи между отклонениями индукции насыщения материалов деталей электромагнита и первой главной компонентой $PC1$, описывающей тяговую характеристику электромагнита. Результатом моделирования стало семейство графиков тяговых характеристик, изображенных на рис. 3.

Результаты исследования и их обсуждение

После проведенных модельных экспериментов данные обрабатывались в программном пакете Statistica. Результаты обработки представлены в табл. 2–4.

Получена адекватная модель с расчетным значением критерия Фишера, равным 0,318, при этом критическое значение критерия Фишера равно 3,68.

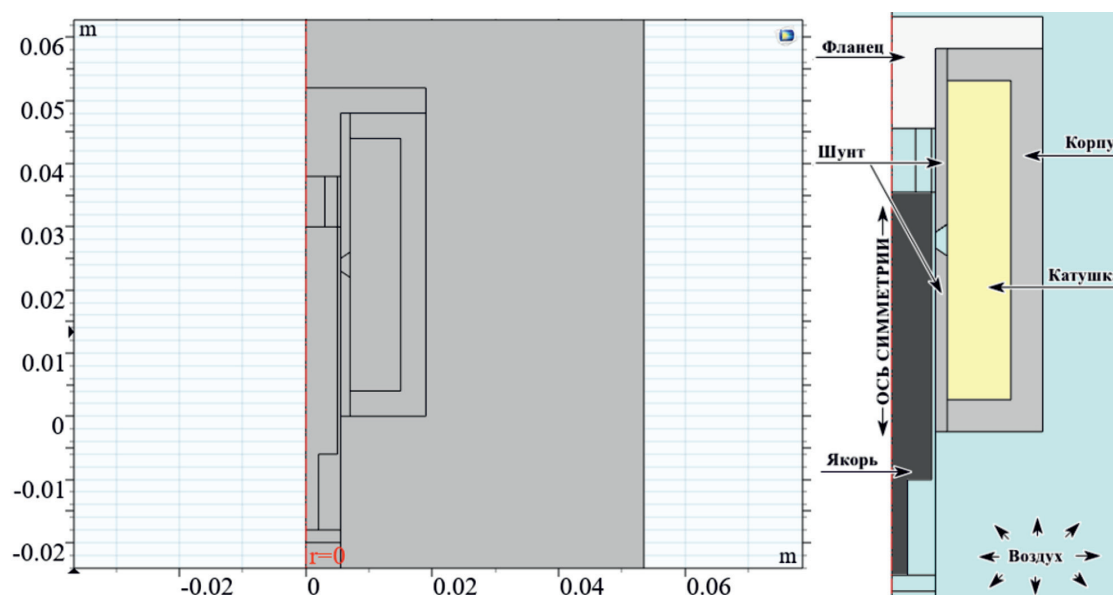


Рис. 2. Геометрическое представление модели (слева) и пояснение к геометрическому представлению (справа)

Таблица 1

Матрица ОЦКП

№	$B_{\text{якоря}}$		$B_{\text{шунта}}$		$B_{\text{корпуса}}$		PC 1
	Кодир.	Физич.	Кодир.	Физич.	Кодир.	Физич.	
1	[+]	+5 %	[+]	+5 %	[+]	+5 %	-0.99996936161
2	[-]	-5 %	[+]	+5 %	[+]	+5 %	-0.99998092079
3	[+]	+5 %	[-]	-5 %	[+]	+5 %	-0.99999572771
4	[-]	-5 %	[-]	-5 %	[+]	+5 %	-0.99999210790
5	[+]	+5 %	[+]	+5 %	[-]	-5 %	-0.99999445573
6	[-]	-5 %	[+]	+5 %	[-]	-5 %	-0.99999758042
7	[+]	+5 %	[-]	-5 %	[-]	-5 %	-0.99998533392
8	[-]	-5 %	[-]	-5 %	[-]	-5 %	-0.99997114667
9	$[-\alpha]$	-6,075 %	[0]	0 %	[0]	0 %	-0.99999776751
10	$[\alpha]$	+6,075 %	[0]	0 %	[0]	0 %	-0.99999841505
11	[0]	0 %	$[-\alpha]$	-6,075 %	[0]	0 %	-0.99998467421
12	[0]	0 %	$[\alpha]$	+6,075 %	[0]	0 %	-0.99998188734
13	[0]	0 %	[0]	0 %	$[-\alpha]$	-6,075 %	-0.99999428441
14	[0]	0 %	[0]	0 %	$[\alpha]$	+6,075 %	-0.99999044295
15	[0]	0 %	[0]	0 %	[0]	0 %	-0.99999973724

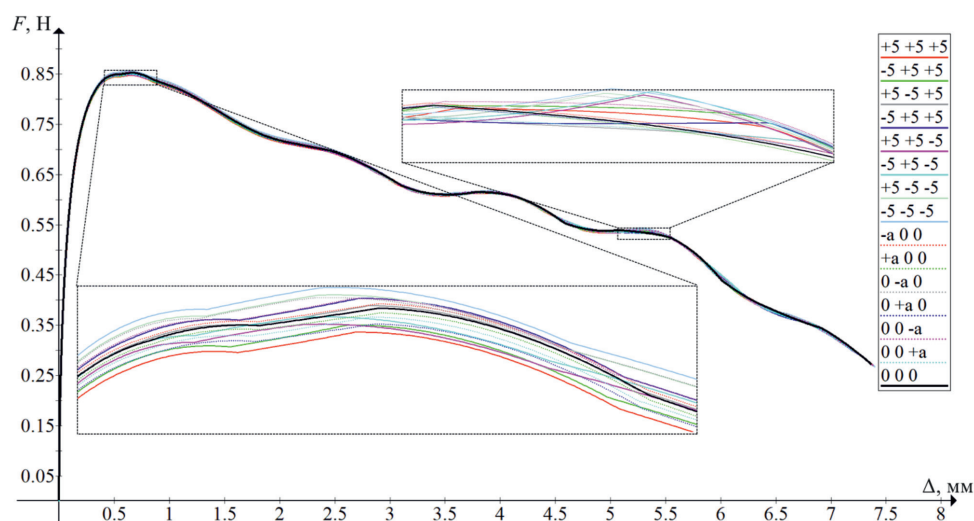


Рис. 3. Семейство тяговых характеристик электромагнита, полученных из модели

Таблица 2

Листинг с оценкой коэффициентов регрессии в кодированных значениях

Фактор	Эффект	Сред. квад. откл.	$t(30)$	p	-95% Довер. инт.	+95% Довер. инт.	Коэф.
Средн./Свобод. член	-0,999998	0,000002	-658131	0,000	-1,0	-0,99	-0,999998
(1L) $B_{\text{якоря}}$	-0,000001	0,000001	-1	0,613	-0,0	0,00	-0,000000
(1Q) $B_{\text{якоря}}$	-0,000001	0,000002	-0	0,628	-0,0	0,00	-0,000001
(2L) $B_{\text{шунта}}$	0,000001	0,000001	1	0,487	-0,0	0,00	0,000000
(2Q) $B_{\text{шунта}}$	0,000019	0,000002	9	0,000	0,0	0,00	0,000009
(3L) $B_{\text{корпуса}}$	0,000003	0,000001	2	0,058	-0,0	0,00	0,000001
(3Q) $B_{\text{корпуса}}$	0,000007	0,000002	3	0,005	0,0	0,00	0,000003
1L и 2L	0,000008	0,000002	5	0,000	0,0	0,00	0,000004
1L и 3L	0,000005	0,000002	3	0,007	0,0	0,00	0,000002
2L и 3L	0,000018	0,000002	11	0,000	0,0	0,00	0,000009

Таблица 3

Листинг с оценкой коэффициентов регрессии в физических значениях

Фактор	Коэф. регр.	Сред. квад. откл.	$t(30)$	p	-95% Довер. инт.	+95% Довер. инт.
Средн./Свобод. член	-0,999998	0,000002	-658	0,000	0	-1,00000
(1L) $B_{\text{н}}$ якоря	-0,000007	0,000014	-1	0,613	-0,000	0,000
(1Q) $B_{\text{н}}$ якоря	-0,000216	0,000442	-0	0,628	-0,001	-0,001
(2L) $B_{\text{н}}$ шунта	0,000010	0,000014	1	0,487	-0,000	-0,000
(2Q) $B_{\text{н}}$ шунта	0,003797	0,000442	9	0,000	0,003	0,003
(3L) $B_{\text{н}}$ корпуса	0,000028	0,000014	2	0,058	-0,000	-0,000
(3Q) $B_{\text{н}}$ корпуса	0,001336	0,000442	3	0,005	0,000	0,000
1L и 2L	0,001625	0,000327	5	0,000	0,001	0,001
1L и 3L	0,000950	0,000327	3	0,007	0,000	0,000
2L и 3L	0,003655	0,000327	11	0,000	0,003	0,003

Таблица 4

Листинг с оценкой адекватности модели

Фактор	Сумм. сред. квад. ошиб.	Степ. своб.	Дисперсия	F (крит. Фишера)	p
(1L) $B_{\text{н}}$ якоря	4,19E-12	1	4,19E-12	0,262	0,613
(1Q) $B_{\text{н}}$ якоря	3,83E-12	1	3,83E-12	0,239	0,628
(2L) $B_{\text{н}}$ шунта	7,94E-12	1	7,94E-12	0,496	0,487
(2Q) $B_{\text{н}}$ шунта	1,18E-09	1	1,18E-09	73,68	0,000
(3L) $B_{\text{н}}$ корпуса	6,22E-11	1	6,22E-11	3,886	0,058
(3Q) $B_{\text{н}}$ корпуса	1,46E-10	1	1,46E-10	9,118	0,005
1L и 2L	3,96E-10	1	3,96E-10	24,74	0,000
1L и 3L	1,35E-10	1	1,35E-10	8,463	0,007
2L и 3L	2,00E-09	1	2,00E-09	125,3	0,000
Отсут. соглас.	2,54E-11	5	5,09E-12	0,318	0,898
Чистая ошибка	4,80E-10	30	1,60E-11		
Суммар. ошиб. сред. кв. откл.	4,44E-09	44			

Полученное уравнение регрессии, отражающее зависимость первой главной компоненты и отклонений максимальных индукций материалов магнитного шунта $\delta B_{\text{ш}}$, корпуса $\delta B_{\text{к}}$ и якоря $\delta B_{\text{як}}$, имеет вид:

$$PC1 = -1 + 3,80 \cdot 10^{-3} \cdot \delta B_{\text{ш}}^2 + 1,34 \cdot 10^{-3} \cdot \delta B_{\text{к}}^2 + \\ + 1,63 \cdot 10^{-3} \cdot \delta B_{\text{як}} \cdot \delta B_{\text{ш}} + 0,95 \cdot 10^{-3} \cdot \delta B_{\text{як}} \cdot \delta B_{\text{к}} + \\ + 3,66 \cdot 10^{-3} \cdot \delta B_{\text{к}} \cdot \delta B_{\text{ш}}.$$

Данные уравнения регрессии можно использовать при подборе деталей электромагнита на комплементарной, взаимодополняющей основе, заключающейся в выборе таких деталей для сборки, чтобы в собранном виде их магнитные свойства обеспечивали наименьшее отклонение тяговой характеристики электромагнита.

Выводы

1. Результатом проведенного эксперимента стала регрессионная математическая

модель, позволяющая осуществлять комплементарный подбор деталей электромагнита по их отклонениям магнитной индукции насыщения.

2. Из полученной модели видно, что наибольшую зависимость на тяговую характеристику оказывают магнитные свойства материала магнитного шунта и их взаимодействие с магнитными свойствами материала корпуса, при этом магнитные свойства якоря слабо влияют на параметры тяговой характеристики, их влияние проявляется только во взаимодействии с магнитными свойствами материалов шунта и корпуса.

3. Полученная модель позволит реализовать метод комплементарной сборки, заключающийся в подборе комплекта деталей для сборки электромагнита таким образом, чтобы отклонение от номинальных характеристик одних компонентов компенсировало отклонение других с целью получить требуемую тяговую характеристику.

Список литературы

1. Киселев В.И., Копылов А.И., Кузнецов Э.В., Герасимов В.Г. Электротехника и электроника. Книга 2. Электромагнитные устройства и электрические машины. М: ООО «Торгово-Издательский Дом «Арис», 2010. 271 с.
2. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Вольт П.С., Соломенцев К.Ю. Устройство для измерения напряженности магнитного поля // Патент РФ № 2194286 Патентообладатель: Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). 2002. Бюл. № 34.
3. Kallenbach E., Eick R., Quendt P., Ströhla T., Feindt K., Kallenbach M., Radler O. Elektromagnete. Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung. Springer Vieweg, 2012. 436 p.
4. Hayt W., Buck J. Engineering Electromagnetics. McGraw-Hill Higher Education, 2012. 608 p.
5. Gieras J. Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion. CRC Press, 2017. 450 p.
6. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Задворкин С.М., Вичужанин Д.И., Митропольская С.Ю. Влияние накопленной деформации сдвига и поврежденности при кручении на магнитные характеристики стали // Физическая мезомеханика. 2004. № 7 (часть 2). С. 311–314.
7. Татевосян А.С., Пимонова У.В., Поляков Д.А., Шелковников С.В., Шелковникова Ю.В. Уравнения динамики электромагнита постоянного тока и исследование его динамических характеристик // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1 (1). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17496> (дата обращения: 20.07.2020).
8. Гладких С.А., Ланкин А.М., Ланкин И.М. Определение термина «комплементарная сборка» для электромагнитов и обоснование его как метода // Вестник молодёжной науки России: электронный научный журнал. 2020. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youth-science.com/vypusk-1-2020> (дата обращения: 10.07.2020).
9. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
10. Lankin A., Shaykhutdinov D., Grechikhin V., Schuchkin D., Narakidze N., Gorbatenko N. Principal component analysis for electromagnetic drives technological production process control. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. no. 2. P. 363–373.
11. Мхитарян В.С. Эконометрика: учебник. М.: Издательство Проспект, 2014. 382 с.