

УДК 621.317.4

АППРОКСИМАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Ланкин А.М.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: lankinjohn@rambler.ru

В статье описано применение кусочной аппроксимации к динамической характеристике намагничивания. Целесообразность данного подхода заключается в сокращении объема данных, используемых для описания характеристики. Так как динамическая характеристика намагничивания является сложной и одной функцией ее описать крайне затруднительно, предлагается разбить ее на участки, каждый из которых описывать полиномом первой, второй или третьей степени. Для исследования применимости аппроксимации были рассмотрены динамические характеристики намагничивания кондиционных пропорциональных электромагнитов гидроприводов и с различными технологическими отклонениями. Для наглядности использовалась восходящая ветвь динамической характеристики намагничивания. Проведена оценка погрешности при аппроксимации характеристики, которая по результатам экспериментальных исследований не превысила требуемые 3%. В результате исследований можно сделать вывод о целесообразности применения аппроксимирующих выражений для описания динамических характеристик намагничивания.

Ключевые слова: динамическая характеристика намагничивания, кусочная аппроксимация, пропорциональные электромагниты, оценка погрешности аппроксимации

APPROXIMATIONS OF DYNAMICAL MAGNETIZATION CHARACTERISTIC OF THE ELECTROMAGNET

Ланкин А.М.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Educational «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: lankinjohn@rambler.ru

The article describes the use of piecewise approximation to the dynamic characteristics of the magnetization. The feasibility of this approach is to reduce the amount of data used to describe the characteristics. Since the dynamic characteristic of the magnetization is a complex one, and its function is extremely difficult to describe, it is proposed to split it into segments, each of which is described by a polynomial of the first, second or third degree. To approximate the applicability of the study were considered the dynamic characteristics of the magnetization conditional proportional solenoids and hydraulic actuators with different technological variations. For clarity used the ascending branch of the dynamic characteristics of the magnetization. The estimation error in the approximation of characteristics, which according to the results of experimental studies did not exceed 3% required.

Keywords: dynamic characteristic magnetization, piecewise approximation, proportional electromagnets, the approximation error evaluation

Технологической контроль процесса изготовления пропорциональных электромагнитов начинается с получения характеристики, содержащей информацию о технических параметрах, зависящих от режимов технологического процесса. Определение такой характеристики должно осуществляться на полностью собранном изделии и быть малозатратным с точки зрения времени и технических ресурсов. Такой интегральной характеристикой является динамическая характеристика намагничивания (ДХН) [1]. В работах [2, 4, 7] показано, что имея ДХН электромагнитного привода (рис. 1) можно рассчитать ряд характеристик, регламентированных ГОСТ [3]: статическую и динамическую тяговые характеристики $F = f(\delta)$ и $F_d = f(\delta)$, характеристики движения якоря $\delta = f(t)$ и изменение тока в обмотке во времени $i = f(t)$.

После подачи питания ток в обмотке достигает значения тока трогания, кото-

рому соответствует точка 1. В это мгновение якорь приходит в движение, в процессе которого рабочий зазор δ уменьшается, индуктивность обмотки растет, а ток в ней падает до тех пор, пока якорь не притянется к сердечнику, чему соответствует точка 2. Во время движения якоря связь между магнитным потоком Φ и током I определяется кривой 1–2.

По окончании движения якоря ток опять начинает возрастать, достигая установившегося значения в точке 3. После отключения питания электромагнита ток в обмотке падает и при достижении значения тока отпускания $I_{отп}$ (точка 4) якорь приходит в движение, а рабочий зазор увеличивается от минимального δ_{min} до максимального δ_{max} . Точка 5 соответствует окончанию движения якоря электромагнита. Далее ток спадает до нуля, чему соответствует точка 6. Из-за остаточной намагниченности магнитопровода поток, соответствующий точке 6, больше нуля.

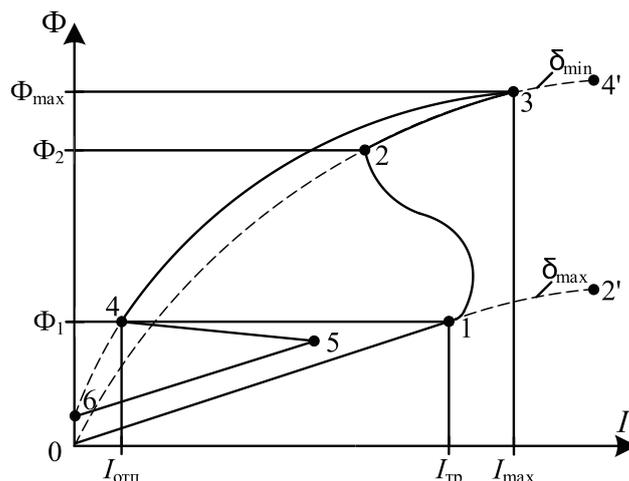


Рис. 1. ДХН электромагнитного привода

Динамическая характеристика намагничивания электромагнитного привода несет информацию о магнитных, электрических, тяговых и динамических свойствах пропорциональных электромагнитов, а для ее получения могут быть использованы так называемые «бессенсорные» устройства [8]. При этом не требуется разборка испытуемого изделия и по рабочей обмотке протекают токи соответствующие номинальным.

Использование ДХН в виде массива пар точек магнитный поток ток для дальнейшей обработки затруднительно. Большой объем данных (одна ДХН, измеренная с погрешностью до 3 %, содержит порядка 15000 пар точек) предъявляет высокие требования к производительности средств обработки и увеличивает время расчетов. В связи с этим часто применяют аппроксимацию

этой характеристики выражениями, описывающими каждый участок ДХН. Метод кусочной аппроксимации заключается в замене участков 0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6 ДХН аппроксимирующими кривыми, описываемыми полиномами вида

$$y = \sum_1^m k_n x^n + b,$$

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

Такая замена ДХН позволяет вести расчет аналитически с помощью линейных уравнений, а в случае необходимости определять требуемое количество точек ДХН.

Типы дефектов в исследуемых пропорциональных электромагнитах

Номер ДХН	Вид технологического отступления от номинала	Максимальное значение магнитного потока, Вб
1	Без технологических отступлений	0,147
2	На 10% от номинала уменьшено количество витков рабочей обмотки	0,129
3	На 10% от номинала увеличено количество витков рабочей обмотки	0,166
4	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала якоря	0,136
5	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала якоря	0,158
6	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала ярма	0,146
7	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала ярма	0,148
8	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала корпуса	0,146
9	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала корпуса	0,148

Проведена аппроксимация ДХН, измеренных с помощью прибора *MagHyst* [9] для ряда пропорциональных электромагнитов. При этом взяты характеристики как кондиционных устройств (ДХН1), так и электромагнитов с различными технологическими отступлениями (ДХН2 – ДХН9) (таблица).

Для наглядности далее будем рассматривать только восходящую ветвь ДХН, т.е. участки 0–1, 1–2, 2–3.

Из-за неоднозначности ДХН (при одном значении тока характеристика может принимать несколько значений магнитного потока), рассмотрим не зависимость $\Phi(i)$ (рис. 2), а обратную характеристику $i(\Phi)$ (рис. 3).

Первый и второй участки ДХН можно описать полиномом первой степени. Первый выходит из начала координат по этому коэффициент $b^{(1)} = 0$:

$$y^{(1)} = k_1^{(1)} x,$$

второй участок ДХН имеет вид

$$y^{(2)} = k_1^{(2)} x + b^{(2)}.$$

Третий участок можно описать полиномом второй или третьей степени:

$$y^{(3)} = k_1^{(3)} x + k_2^{(3)} x^2 + b^{(3)};$$

$$y^{(3)} = k_1^{(3)} x + k_2^{(3)} x^2 + k_3^{(3)} x^3 + b^{(3)}.$$

На рис. 4 приведена ДХН 1, с аппроксимациями третьего участка второй и третьей степенью.

Погрешность при применении полинома второй степени составила 8%, а при применении полинома третьей степени не превысила приемлемые для магнитных измерений 3%. Для определения погрешности аппроксимации находят различия между исходной и аппроксимирующей характеристиками. Метод нахождения погрешности аппроксимации [1, 5, 6] поясняет рис. 5. На исходной $\Phi_1(I)$ задаются рядом точек, в которых строят перпендикуляры до пересечения с аппроксимирующей характеристикой $\Phi_2(I)$.

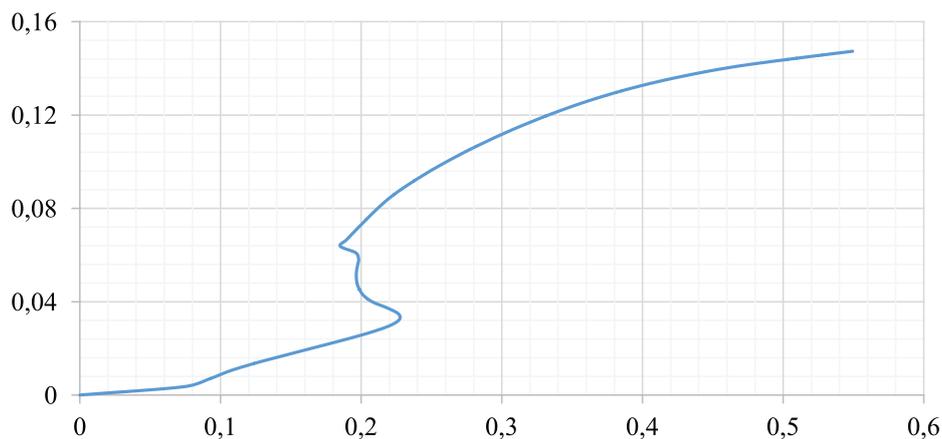


Рис. 2. ДХН вида $\Phi(i)$ кондиционного пропорционального электромагнита

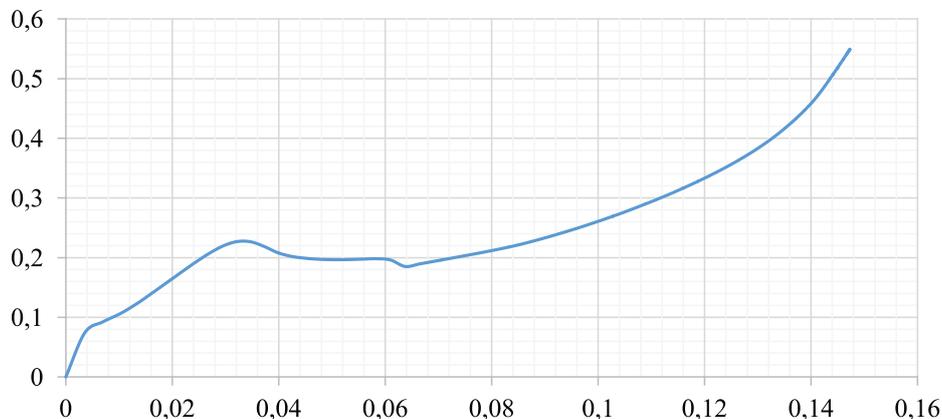


Рис. 3. ДХН вида $i(\Phi)$ кондиционного пропорционального электромагнита

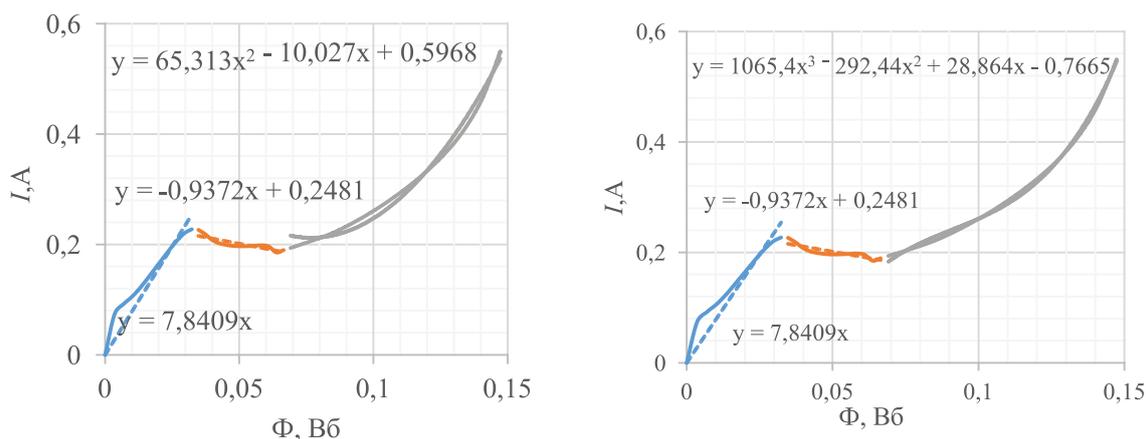


Рис. 4. Аппроксимированная ДХН 1 вида $i(\Phi)$

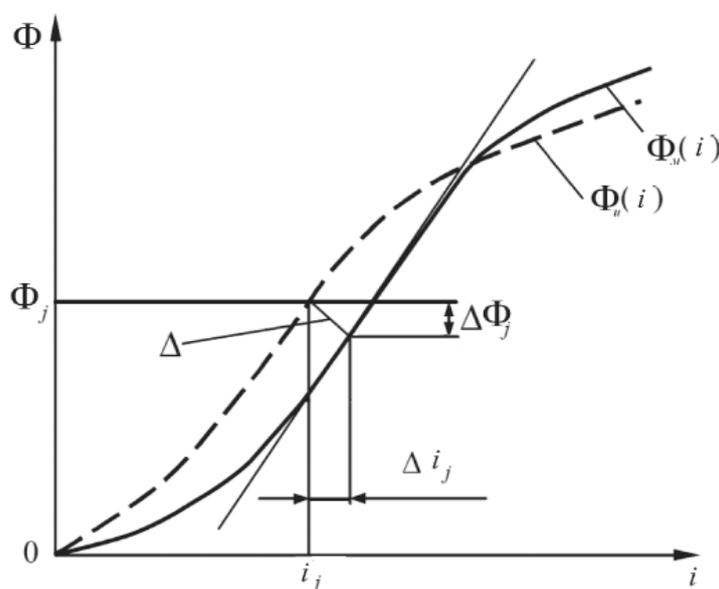


Рис. 5. Метод нахождения погрешности аппроксимации

Абсолютные погрешности по магнитному потоку Φ и току I в каждой исследуемой точке определяют как проекции отрезков заключенных между образцовой и измеренной характеристиками $\Delta\Phi$ и ΔI на оси координат. Относительные погрешности по току I и потоку Φ , а также полная погрешность измерения характеристики определяются выражениями

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I}; \quad \delta_\Phi = \frac{\Delta\Phi}{\Phi}; \quad \delta = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_\Phi^2}.$$

Из полученных результатов выбирается максимальный и принимается в качестве погрешности аппроксимации.

На рис. 6 представлены ДХН2 – ДХН9 пропорциональных электромагнитов с раз-

личными технологическими отступлениями от номинала.

В результате исследований можно сделать вывод о целесообразности применения аппроксимирующих выражений для описания динамических характеристик намагничивания. Применение данного подхода позволит сократить объем измерительной информации без ее потери, что положительно скажется на скорости обработки данных. Например, для описания каждой из исследуемых характеристик использовался массив из 15000 пар точек, а после применения аппроксимации требуется семь значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов и четыре значения, задающие точки соединения участков 0–1, 1–2, 2–3.

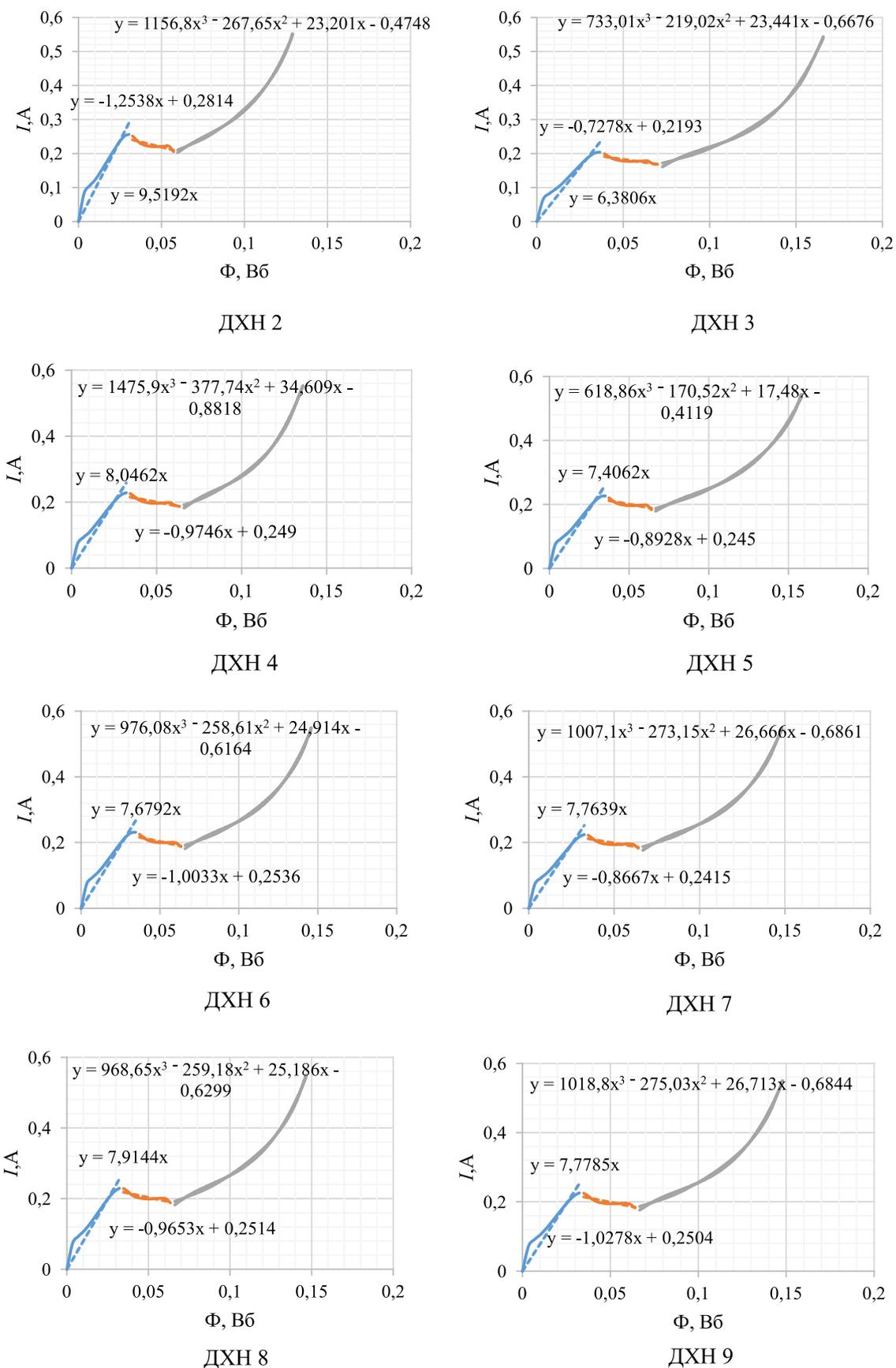


Рис. 6. ДХН пропорциональных электромагнитов с технологическими отступлениями от номинала

Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 15-38-20652 «Развитие теории бессенсорных прогнозирующих методов управления и диагностики электроприводов» с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ (НПИ).

Список литературы

1. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерений магнитных параметров материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
2. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 447 с.
3. ГОСТ 19264-82 – Электромагниты управления. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 31 с.
4. Ковалев О.Ф. Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.
5. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Программа нахождения погрешности измеренных вебер-амперных характеристик электротехнических устройств // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 12 дек. 2014 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2015. – С. 57–61.
6. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Определение погрешности измерения вебер-амперной характеристики Св. № 2015610308 Россия. – Заявл. 06.11.2014 Зарег. 12.01.2015.
7. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972, – 248 с.
8. Широков К.М., Гречихин В.В. Исследование бессенсорных устройств определения магнитных характеристик для систем управления производством электромагнитов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 – С. 1173–1178.
9. Patent DE 10 2006 043 239 A1. Glet U.: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen.