

8-7-2020

ANALYSIS OF THE TYPE OF APPROXIMATION MAGNETIZATION CURVE FOR HIGH-CURRENT ELECTROMAGNETIC TRANSDUCERS

A M. Safarov

Tashkent Institute of railway transport engineers

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

Recommended Citation

Safarov, A M. (2020) "ANALYSIS OF THE TYPE OF APPROXIMATION MAGNETIZATION CURVE FOR HIGH-CURRENT ELECTROMAGNETIC TRANSDUCERS," *Scientific-technical journal*: Vol. 3 : Iss. 3 , Article 8.
Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol3/iss3/8>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

**ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND
INFORMATION TECHNOLOGIES**

УДК:621:317

**ANALYSIS OF THE TYPE OF APPROXIMATION MAGNETIZATION CURVE FOR
HIGH-CURRENT ELECTROMAGNETIC TRANSDUCERS****Safarov A.M.**

Tashkent Institute of railway transport engineers

**АНАЛИЗ ВИДА АППРОКСИМАЦИИ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОКОВ****Сафаров А.М.**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

**ЭЛЕКТРОМАГНИТ КАТТА ТОК ЎЗГАРТГИЧЛАРИ УЧУН МАГНИТЛАНИШ
ЭГРИ ЧИЗИҚЛАРИ АПРОКСИМАЦИЯСИ КЎРИНИШЛАРИНИ ТАҲЛИЛИ****Сафаров А.М.**

Тошкент темир йўл муҳандислари институти

Abstract: In the article discuss analyzes the type of approximation of the magnetization curve of a direct current, alternating current, direct current and alternating current magnetic circuit in order to calculate the magnetic circuits of high-current electromagnetic transducers.

Keywords: current transducer, magnetic circuit, magnetization curve, direct current, alternating current, types of approximation, accuracy.

Аннотация: В статье произведен анализ вида аппроксимации кривой намагничивания магнитной цепи постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного тока с целью расчета магнитных цепей электромагнитных преобразователей больших токов.

Ключевые слова: преобразователи тока, магнитная цепь, кривой намагничивания, постоянный ток, переменный ток, виды аппроксимации, точность.

Аннотация: Мақолада катта тоқларни электромагнит ўзгартгичларнинг магнит занжирларини ҳисоблаш мақсадида магнит занжири магнитланиш эгри чизигини аппроксимациялаш кўринишини ўзгармас токда, ўзгарувчан токда, ўзгармас ва ўзгарувчан токда таҳлили кўриб чиқилган.

Таянч сўзлар: ток ўзгартгичи, магнит занжири, магнитланиш эгри чизиги, ўзгармас ток, ўзгарувчан ток, аппроксимация кўринишлари, аниқлик.

Введение.

Магнитные элементы широко используются в информатике, измерительной технике, вычислительных и управляющих системах. Исследование и разработка новых преобразователей, основанных на использовании магнитных свойств материалов, является актуальным направлением при создании информационных систем [1,2].

В настоящее время известно ряд работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных вопросам разработки методики расчетов магнитных цепей с учётом нелинейности магнитных характеристик. Однако, большинство из этих работ велись по методике, основанной на линеаризации магнитных характеристик, где частично учитываются нелинейности, что приводит к неточному расчёту, в результате чего невозможно правильно выбирать оптимальные соотношения между параметрами для получения наиболее эффективных значений основных характеристик магнитных цепей электромагнитных преобразователей больших токов (ЭМПБТ). Поэтому необходимо создать

ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND INFORMATION TECHNOLOGIES

методику расчета магнитных цепей ЭМПБТ с учетом нелинейности магнитных характеристик, дающую возможность решить поставленную задачу в общем виде, что является преимуществом перед графическим и графоаналитическими методами расчета. Для получения такого метода магнитных цепей ЭМПБТ необходимо описать магнитные характеристики аналитическими выражениями [3,4,5].

В настоящее время известны около ста аналитических выражений, определённые методом аппроксимации кривой намагничивания $B = f(H)$ и зависимости удельного магнитного сопротивления ρ_μ от магнитной индукции $B - \rho_\mu = f(B)$, полученные отечественными и зарубежными авторами [6÷10]. Из этих выражений необходимо выбрать наиболее простые и дающие возможность решить поставленную задачу до конца, получая при этом не громоздкий результат достаточной точности. Качество разрабатываемой методики расчёта зависит от правильного выбора формулы аппроксимации. С целью выбора подходящего выражения аппроксимации для получения более совершенного метода расчёта магнитных цепей ЭМПБТ, с учётом нелинейности магнитных характеристик, автор делает анализ существующих аналитических выражений магнитных характеристик и рекомендует новые формулы аппроксимации кривой намагничивания для магнитомодуляционных магнитных цепей ЭМПБТ.

Магнитные цепи ЭМПБТ могут быть с постоянными, переменными, или одновременно действующими постоянными и переменными источниками МДС. Поэтому, расчёт магнитных цепей ЭМПБТ можно разделить на магнитные цепи постоянного тока, на магнитные цепи переменного тока и на магнитные цепи с одновременно действующими постоянными и переменными токами, то есть на магнитомодуляционные магнитные цепи. Для расчёта этих групп магнитных цепей требуется существующие формулы аппроксимаций кривой намагничивания разделить также на три группы:

- а) аппроксимации кривой намагничивания магнитной цепи постоянного тока;
- б) аппроксимации кривой намагничивания магнитных цепей постоянного и переменного тока;
- в) аппроксимации кривой намагничивания магнитомодуляционных магнитных цепей.

Рассмотрим каждую группу, приводя формулы аппроксимации, встречающиеся в литературе за последние 30-40 лет.

Аппроксимации кривой намагничивания магнитной цепи постоянного тока.

В этой группе рассмотрим аналитические выражения кривой намагничивания, полученные только для расчёта магнитных цепей постоянного тока [11,12,13].

Формула аппроксимации кривой намагничивания магнитной цепи постоянного тока в общем виде даётся в [12].

$$B = K_1 H + (K_2 + K_3 e^{K^1})^g; \quad (1)$$

Где
$$K^1 = \frac{cH^B}{d + BH^B};$$

К одному из частных решений формулы (1) относится формула Копсея, имеющая вид:

$$B = e^{\frac{H}{d+BH}}; \quad (2)$$

Однако, формула (2) обладает следующими недостатками:

при $H = 0; B = 0$, а в действительности индукция должна равняться нулю; при $H \rightarrow \infty$, $\frac{dB}{dH} \rightarrow 0$, а в действительности последняя должна стремиться к единице.

Формула, предложенная в [12].

$$B = K_1 \sqrt{\ln K_2 H} \quad (3)$$

**ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND
INFORMATION TECHNOLOGIES**

имеет следующий недостаток: при $H=0$ индукция $B = \sqrt{\infty}$. С целью его устранения формула (3) переписывается в следующем виде:

$$B = K_1 \sqrt{\ln(K_2 H + 1)}; \quad (4)$$

Однако, формула (4) обладает большой неточностью при малых напряжениях [12]. В [12,13] приведена формула:

$$H = \frac{1}{\alpha L} (e^{\alpha \Phi} - 1); \quad (5)$$

Коэффициенты аппроксимации формулы (5) могут быть определены с достаточной точностью методом выбранных точек. При этом необходимо, чтобы величина магнитного потока в выбранной точке до колена равнялась половине величины магнитного потока в точке выбранной после колена кривой намагничивания, что ограничивает область её применения.

Формулы, предложенные Робинзоном

$$B = \frac{H}{\alpha + \beta H}; \quad (6)$$

и Нитгаммером

$$B = a - \frac{b}{H}; \quad (7)$$

пригодны только для аппроксимации кривой намагничивания трансформаторных сталей при $B = (0,6 + 2)T$. При меньших значениях индукции они приводят к большим погрешностям.

По формуле (7) при $H = 0$, магнитная индукция $B = -\infty$ вместо $B = 0$.

Постоянные коэффициенты в формулах аппроксимации (1), (7) определяются по методу выбранных точек [12,13].

Формулы аппроксимаций, приведённые в этой группе, из-за выше упомянутых недостатков не могут широко применяться для аналитического расчёта магнитных цепей ЭМПБТ.

Аппроксимация кривой намагничивания магнитных цепей постоянного и переменного тока.

В этой группе рассматриваются универсальные формулы аппроксимаций кривой намагничивания, пригодные для аналитического расчёта магнитных цепей ЭМПБТ как на постоянном токе – с одним значением постоянных коэффициентов, так и на переменном токе – с другим значением постоянных коэффициентов.

Одна из первых рекомендованных формул [12], относящейся к этой группе, имеет следующий вид:

$$B = A \arctg(aH) \quad (8)$$

Эта формула с добавлением линейного члена, запишется в виде:

$$B = A \arctg(aH) + cH \quad (9)$$

Формула (9) хорошо описывает действительную кривую намагничивания трансформаторных сталей, причём, при малых H расчётная кривая проходит несколько выше, а при больших H немного ниже действительной кривой намагничивания.

Аппроксимации полиномом по степеням B в общем случае запишется в следующем виде [12,13]

$$H = a_0 B + a_1 B^3 + a_2 B^5 + a_3 B^7 + \dots; \quad (10)$$

Чем больше число членов в правой части, тем лучше будет совпадать расчётная кривая с действительной кривой. Если ограничиться тремя членами ряда, то оказывается, что второй член отрицателен и формула приобретает вид:

$$H = a_0 B - a_1 B^3 + a_2 B^5; \quad (11)$$

**ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND
INFORMATION TECHNOLOGIES**

В том случае кривая намагничивания аппроксимируется с хорошей точностью, причём, расчётная кривая проходит до колена выше, а за коленом немного ниже.

Формулам аппроксимации полиномом по степеням B родственными являются формулы:

$$H = \frac{1}{B\lambda} \operatorname{tg} \epsilon B; \quad (12)$$

$$H = aSh\beta B; \quad (13)$$

Уравнение (13) значительно лучше описывает кривую намагничивания, чем уравнение (12).

Кривая намагничивания магнитных материалов может аппроксимироваться при помощи формулы полинома по степеням H , которым можно отнести формулу:

$$B = K_1 H + K_2 H^2; \quad (14)$$

Недостатком этой формулы является то, что она описывает только часть кривой намагничивания, то есть при $H = 0 + H_{\text{макс}}$.

Более точно описывает кривую намагничивания при малых индукциях формула, предложенная К. Вульфсоном [12].

$$B = \alpha H + \beta H^3 + \gamma H^5; \quad (15)$$

и формула [12], имеющая вид:

$$B = aSh\beta H; \quad (16)$$

Если гиперболический синус из (16) разложить в ряд Тейлора и ограничиться тремя членами ряда - получается выражение аналогичное (15)

$$B = a \left[\beta H + \frac{1}{6} (\beta H)^3 + \frac{1}{120} (\beta H)^5 \right]; \quad (17)$$

Коэффициенты формул (6) + (17), с достаточной точностью, определяются по методу выбранных точек.

М.А. Панасенков предложил взаимно обратимые зависимости для аппроксимации кривой намагничивания, которые имеют вид:

$$B = \frac{cH}{a + H}; \quad (18)$$

$$H = \frac{aB}{c - B} \quad (19)$$

Эти формулы хорошо описывают кривую намагничивания при статических и динамических режимах. Недостатком такой аппроксимации является: при $a = -H$, $B = \infty$ или, при $c = B$, во втором уравнении, $H = \infty$.

Описание кривой намагничивания одновременно двумя зависимостями предложено М.Ф. Зариповым [6] и имеет следующий вид:

$$B = m_H H - n_H H^3; \quad (20)$$

$$H = \rho_B B + d_B B^3; \quad (21)$$

Коэффициенты m_H , n_H , ρ_B , d_B связаны между собой определенными зависимостями и могут быть определены по методу выбранных точек. Формулы (20) и (21) просты и пригодны для аппроксимации кривой намагничивания в большом диапазоне изменения магнитной индукции.

Одними из последних разработанных формул аппроксимации кривой намагничивания являются формулы, полученные при предположении намагничивания относительно некоторой оси, пересекающей кривую в области «колена» [13], которая записывается в следующем виде:

$$y' = A + Bx' \pm K \sqrt{M(x' - d) + N}, \quad (22)$$

ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND INFORMATION TECHNOLOGIES

где A, B, K, M, N - постоянные коэффициенты, которые определяются по методу, рекомендованному в [13].

Формула (22), при описывании кривой намагничивания стала типа АРМКО, принимает вид:

$$B = 0,962 - 1,82 \cdot 10^{-2} H + 10^{-2} \sqrt{0,337(H + 400)^2 - 11430}, \quad (23)$$

но при $H = 0$ и $B = 0$ под корнем получается мнимая единица, что является недостатком этого метода.

Применяется также кусочно-линейная аппроксимации [12,13] достоинством которой является сведение нелинейной задачи к линейной. Однако применение такого метода возможно лишь на ограниченном участке кривой, или для материалов с не высокой степенью нелинейности кривой намагничивания.

Коэффициенты выше приведённых формул аппроксимаций могут определяются методом выбранных точек или методом наименьших квадратов, а коэффициенты формулы при аппроксимации - степенным полиномом, кроме того, могут определяться методом интерполяции. Из этих методов наиболее точным является метод наименьших квадратов, но он громоздок, поэтому этот метод применяется, когда требуется высокая точность при аппроксимации кривой намагничивания. Определение коэффициентов по методу выбранных точек уступает по точности методу наименьших квадратов, но проще и нагляднее.

На основе вышеприведённого анализа существующих формул аппроксимаций, их достоинств, недостатков и областей применения для аналитического расчёта магнитных цепей ЭМПБТ, в зависимости от величин магнитных индукций, выбрали формулы (11), (13) для аппроксимации кривой намагничивания при больших значениях магнитной индукции и (15), (16) для аппроксимации кривой намагничивания при малых индукциях. Эти формулы пригодны для аппроксимации кривой намагничивания как на постоянном токе, так и на переменном токе, отличаясь значениями постоянных коэффициентов. Для отличия коэффициентов будем писать индекс (\sim) – для формул аппроксимации переменного тока и ($=$) – для формул аппроксимации постоянного тока.

В информационно-измерительной технике и в системе автоматики находят широкое применение различные преобразователи, магнитопроводы которых намагничиваются одновременно постоянными и переменными магнитными полями. К таким преобразователям относятся магнитные цепи ЭМПБТ - ММ типа. Для аналитического расчёта магнитомодуляционных магнитных цепей требуется описать аналитическими выражениями кривые намагничивания магнитных материалов при одновременном намагничивании постоянными и переменными магнитными полями. Кривые намагничивания магнитомодуляционных магнитных цепей в отличие от кривых намагничивания $B = f(H)$ магнитных цепей с одним магнитным полем описывается функцией с двумя неизвестными в виде $B_{\sim} = f(H_{\sim}, B_{\sim})$ или $B_{\sim} = f(H_{\sim}, B_{\sim})$, то есть кривая намагничивания постоянного тока $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ является функцией подмагничивающей величины H_{\sim} или B_{\sim} , а кривая намагничивания переменного тока $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ является функцией подмагничивающей H_{\sim} или B_{\sim} .

Экспериментальные кривые намагничивания для магнитной цепи с параллельно направленными постоянными и переменными магнитными полями даются в [12,13], в [12] приводятся формулы аппроксимации кривой намагничивания. Однако, эти формулы пригодны для расчёта магнитных цепей подобных дросселям или магнитным усилителям, использование их при аналитическом расчёте магнитомодуляционных магнитных цепей приводит к большой погрешности. Поэтому автор предлагает аналитические выражения, описывающие кривую намагничивания магнитомодуляционных магнитных цепей с продольными и поперечными модуляциями. Для определения этих аналитических

**ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND
INFORMATION TECHNOLOGIES**

выражений построим экспериментальную кривую намагничивания в виде $B_{\approx} = f(H_{\approx})$ при различных значениях переменной магнитной индукции B_a как для магнитной цепи с продольной модуляцией, так и для магнитной цепи с поперечной модуляцией [13].

Для использования этих кривых намагничивания при аналитическом расчёте магнитомодуляционных магнитных цепей необходимо их аппроксимировать аналитическими выражениями, имеющих вид:

$$H_{\approx} = a \frac{a_0}{a_0 - B_a} B_1 - \epsilon \left(\frac{a_0}{a_0 - B_a} \right)^3 B_1^3 + c \left(\frac{a_0}{a_0 - B_a} \right)^5 B_1^5; \quad (24)$$

или

$$H_a = a' B_1 - \epsilon' B_1^3 + c' B_1^5; \quad (25)$$

где a_0 , a , ϵ , c - постоянные коэффициенты

$$a_0 = (1.7 \div) T; \quad a = 3.26 A / MT;$$

$$\epsilon = 3.68 A / MT^3 \quad c = 2.96 A / MT^5;$$

B_a - амплитудное значение магнитной индукции переменного тока, причём $B_a = (0 \div 1,2) T$ и B_a ;

B_1 - магнитная индукция постоянного тока при наличии индукции B_a ;

Кривые, определённых по формуле (25) при $B_a = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2, T$; для продольной модуляции с $a_0 = 1.8 T$ и для поперечной модуляции с $a_0 = 1.7 T^{-1}$ приведены в [13].

Расчётные кривые отличаются от экспериментальных кривых не больше чем на 5-6%, а в некотором участке кривой намагничивания эта разность составляет меньше чем один процент.

Полученные кривые намагничивания магнитной цепи с продольной и их формулы аппроксимации успешно могут применяться для расчёта магнитомодуляционных магнитных цепей, где модулируется постоянное магнитное поле, соответствующее области кривой намагничивания выше релейской.

Магнитным цепям ЭМПБТ - ММ типа как с поперечной, так и с продольной модуляцией, позволяющей преобразовать в переменное ЭДС в диапазоне $E_x = 0 \div 100 [MV]$, и тока $I_x = 0 \div 100 [MA]$, соответствует ряд конструкций с $B_{maks} = 0.1 [T]$. После компенсации B_{maks} компенсирующей магнитной индукцией $B_{\approx K}$ их разность $\Delta B_{\approx} (\Delta B_{\approx} = B_{\approx maks} = B_{\approx K})$ стремится к минимуму $B_{\approx min}$, который соответствует порогу чувствительности усилителя ($B_{\approx min} = E$). Если взять порог чувствительности усилителя $E^I = 10 \cdot 10^{-6}$ в, то $B_{\approx min} = 1 \cdot 10^{-4} [T]$.

Установлено, что приведённое значение индукции $B_{\approx min}$ очень мало по сравнению с переменной магнитной индукцией B_{\approx} и почти не влияет на характер кривой намагничивания магнитной цепи как при продольной, так и при поперечной модуляции.

Показано, что при маленьком сигнале постоянного тока зависимости $\mu = f(wt)$ и $\mu_g = f(wt)$ соответственно определяются законами изменения магнитной индукции B_{al} и B_{al} или напряжённости $H_{\approx II}$, $H_{\approx I}$ и почти не зависят от величины магнитной индукции B_{\approx} или напряжённости H_{\approx} постоянного тока.

**ENERGETICS, THE ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONIC DEVICES AND
INFORMATION TECHNOLOGIES**

Литература

- [1]. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – Москва, СОЛОН-ПРЕСС, 2007.
- [2]. Roman M. Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering. - USA: Brown Walker Press, 2011.
- [3]. Датчики тока, промышленное исполнение. - ТВЕЛЕМ. - [URL:http://www.lem.com/ru/ru/content/view/478/882/](http://www.lem.com/ru/ru/content/view/478/882/) (дата обращения: 05.08.2015).
- [4]. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Рустамов Д.Ш. Электромагнитный датчик тока для систем управления устройствами тягового электроснабжения.// Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014, №2. С.26-31.
- [5]. Датчики постоянного и переменного тока. - НИИ Электромеханики. - URL: http://www.niem46.ru/current_sensors/ (дата обращения: 05.08.2015).
- [6]. Bohnert K. A. Revolution in high dc current measurement/ K. Bohnert, P. Guggenbach // ABB Review. 2005, № 1. P. 6-10.
- [7]. Сафаров А.М., Саттаров Х. А. Вопросы поискового проектирования электромагнитных преобразователей больших токов// Мухаммад Ал-Хоразми авлодлари илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнал №20(8), 2019, 99-102 б.
- [8]. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения АBB - от печатной платы до преобразователей-гигантов// Силовая электроника. 2006, № 9. С. 56-57.
- [9]. Hermann W. Dommel. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks// IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1969. Vol. 88. No. 4. P. 388-399.
- [10]. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011, № 2, С.33-35.
- [11]. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Рустамов Д.Ш. Электромагнитный датчик тока для систем управления устройствами тягового электроснабжения.// Химическая технология. Контроль и управление. Ташкент, 2014, №2, С.26-31
- [12]. Наумов В.А., Шевцов В.М. Математические модели трансформатора тока в исследованиях алгоритмов дифференциальных защит// Электрические станции. 2003, №3, С. 51-56.
- [13]. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Рустамов Д.Ш., Атауллаев Н.О. Электромагнитные преобразователи больших токов для систем тягового электроснабжения// Ташкент, «Фан ва технология», 2018.