

УДК 620.179.14

РАСЧЕТ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА: КРИВАЯ СТОЛЕТОВА**С. Г. САНДОМИРСКИЙ**Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

CALCULATION OF MAGNETIZATION OF STEELS ACCORDING TO THE PARAMETERS OF THE HYSTERESIS LOOP LIMIT: STOLETOV CURVE**S. G. SANDOMIRSKI**

Аннотация. Показано, что кривая Столетова стали (зависимость магнитной восприимчивости χ от напряженности магнитного поля H в материале) может быть с достаточной для практики точностью рассчитана по ее коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r . Разработанная формула обоснована статистическим анализом сопоставления результатов расчета и эксперимента для стали ШХ15 в состоянии поставки и закаленной. Результат позволяет отказаться от трудоемких измерений кривых Столетова сталей. Разработанная формула позволяет построить зависимость $\chi(H)$ и проанализировать ее в разных диапазонах изменения H для любых сталей, результаты измерения H_c , M_s и M_r которых приведены в справочной литературе.

Ключевые слова: ферромагнитные стали, основная кривая намагничивания, кривая Столетова, петля магнитного гистерезиса, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила.

Abstract. It is shown that the Stoletov curve of steel (the dependence of the magnetic susceptibility χ on the magnetic field strength H in the material) can be calculated with sufficient accuracy for practice by its coercive force H_c , magnetization M_s technical saturation and residual magnetization M_r . The developed formula is justified by statistical analysis of comparison of calculation results and experiment for steel SHC15 (100Cr6, 52100) in the delivery state and hardened. The result allows to refuse from labor-intensive measurements of Stoletov curves of steels. The developed formula makes it possible to construct the dependence $\chi(H)$ and to analyse it in different ranges of H variation for any steels, the results of H_c , M_s and M_r measurements of which are given in the reference literature.

Keywords: ferromagnetic steels, basic magnetization curve, Stoletov curve, magnetic hysteresis loop, technical saturation magnetization, residual magnetization, coercive force.

Намагничивание ферромагнитных сталей, определяющее их работу в электротехнических устройствах, характеризуют основная кривая намагничивания $M(H)$ (геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получают при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля) и кривая Столетова (график $\chi(H)$ зависимости магнитной восприимчивости χ от напряженности магнитного поля H в ферромагнетике) (рис. 1).

Основными магнитными свойствами материалов, результаты измерения которых приведены в справочной литературе практически для всех сталей,

являются коэрцитивная сила H_c , намагниченность M_s технического насыщения и остаточная намагниченность M_r .

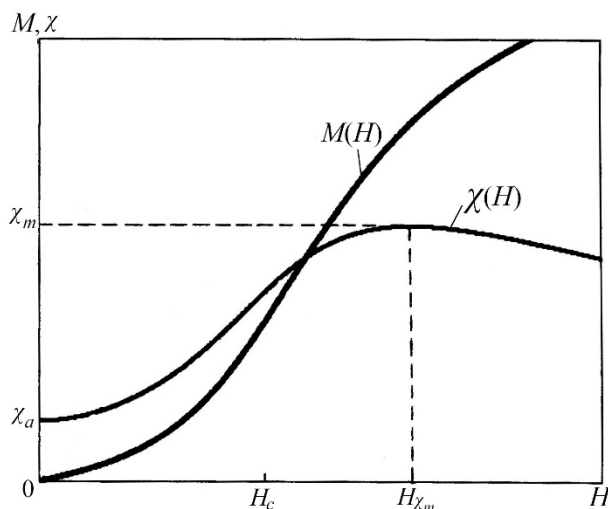


Рис. 1. Основная кривая намагничивания $M(H)$ и кривая Столетова $\chi(H)$ стали

При соблюдении требований [1] относительная погрешность δ измерения H_c магнитомягких ($H_c \leq 4$ кА/м) ферромагнитных материалов не превышает $\pm 2\%$, M_s и M_r — $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $K_{II} = M_r/M_s$ при измерении M_s и M_r на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ [2]. Результаты измерения H_c , M_s и M_r практически всех известных материалов приведены в научной и справочной литературе, например [3–5]. Погрешность δ измерения значений χ на кривой Столетова по методике, регламентированной [1], составляет $\pm 6\%$ [2]. Измерения основных кривых намагничивания и кривых Столетова сталей немногочисленны [3, 4]. Это осложняет выбор оптимальных материалов сердечников измерительных зондов и преобразователей и режимов их изготовления.

Как показано в [6], для аналитического описания изменения намагниченности M на основной кривой намагничивания и кривой Столетова сталей известные исследования предлагают провести измерения параметров, которые отсутствуют в справочной литературе.

Связь намагниченности M на основной кривой намагничивания магнитного материала с параметрами его H_c , M_s и M_r установлена в [7]. Актуальными для решения электротехнических задач являются аналитическое описание изменения магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей по результатам измерения только параметров их предельной петли магнитного гистерезиса и его обоснование.

В работе сообщается о разработке аналитического выражения для описания изменения магнитной восприимчивости χ сталей на кривой Столетова по напряженности H намагничивающего поля, коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r сталей, измеренных на предельной петле гистерезиса.

Разработка формулы для расчета магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей. Не существует точной формы записи функции $\chi(H)$

с учетом формирования, роста и ориентации магнитных доменов. Поэтому в расчетах магнитного состояния сталей используют интерполирующие зависимости. Эксперименты [8] показали, что зависимость $\chi(H)$ конструкционных сталей наиболее точно описывает формула, имеющая следующую компактную запись:

$$\chi = \frac{\chi_a}{1+h^2} + \frac{M_s h}{\pi(h^2+k)} \sum_{n=0}^1 (-1)^n \operatorname{arctg}[T(1+(-1)^n h)], \quad (1)$$

где $h = H/H_c$; $T = \operatorname{tg}(\pi K_{II}/2)$; $K_{II} = M_r/M_s$; $k = \frac{M_s \operatorname{arctg}(2T)}{\pi(M_C - \chi_a H_c / 2)}$; χ_a – начальная магнитная восприимчивость; M_C – намагниченность по основной кривой намагничивания при $H = H_c$.

Непосредственное применение (1) для расчета χ невозможно из-за использования в (1) параметра M_C , отсутствующего в справочниках по магнитным свойствам сталей. Результаты исследований влияния режимов получения сталей на их χ_a не всегда достоверны и приводятся в литературе реже, чем на H_c , M_r и M_s .

Величины χ_a и M_C удалось выразить через M_r , H_c и M_s [9]. Для этого использованы связи между магнитными параметрами сталей. Анализ измерений H_c , M_r и максимальной магнитной проницаемости μ_m 855 разных сталей показал, что наилучшую точность расчета μ_m обеспечивает формула

$$\mu_m \approx \left[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2 \right] \cdot M_r / H_c, \quad (2)$$

где $\tau = 1$ м/кА.

Средняя относительная погрешность $\bar{\delta}$ расчета μ_m сталей по (2) менее 10 %. Это меньше суммы погрешностей δ измерений по стандартным методикам [1] входящих в (2) параметров.

С учетом (2) в [9] установлена достоверная связь μ_a с M_r и H_c сталей:

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c}) H_c}. \quad (3)$$

Результаты статистического анализа связи достоверных результатов измерения μ_a с результатами расчета μ_a по (3) показали, что формула (3) пригодна для расчета μ_a сталей по H_c и M_r . Значение $\bar{\delta} \approx 10,7$ % при расчете μ_a по (3) меньше суммы погрешностей измерения по стандартным методикам [1] входящих в (3) параметров.

С учетом (2) и (3) в расчетах кривой Столетова сталей совместно с формулой (1) следует использовать формулы

$$M_c \approx 0,67[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2]M_r \quad (4)$$

и

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2]M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c})H_c} - 1. \quad (5)$$

Для обоснования правомерности использования формул (1), (4), (5) для расчета зависимости $\chi(H)$ на рис. 2 результаты расчета по ним сопоставлены с результатами экспериментального измерения значений χ при разных H в [8, рис. 7, 8]. Для сопоставления расчета и эксперимента использована сталь ШХ15 в состоянии поставки и закаленная, магнитные параметры по [8] которых приведены в табл. 1.

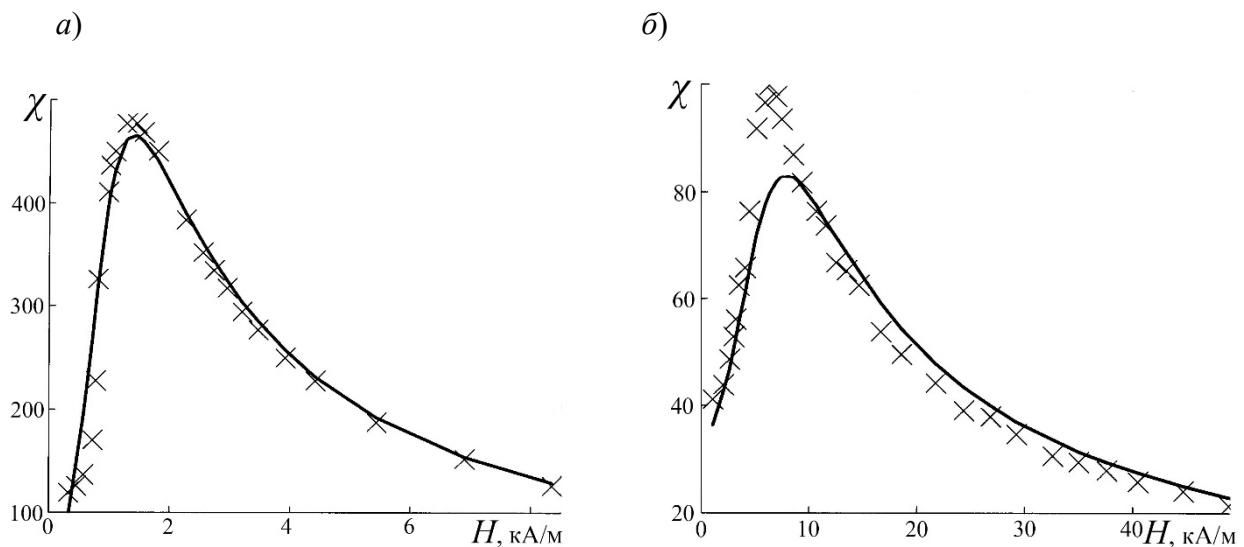


Рис. 2. Зависимость магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 в состоянии поставки (а) и закаленной (б), магнитные свойства которых приведены в табл. 1, от напряженности H намагничивающего поля. χ – экспериментальные результаты по [8]; сплошная кривая – расчет по формулам (1), (4), (5) с использованием результатов измерения H_c , M_s и M_r (см. табл. 1)

Табл. 1. Магнитные параметры стали ШХ15 по [8] и углеродистых сталей по [5, табл. 2]

| Марка стали | Термическая обработка, содержание углерода С, % | Магнитные параметры, кА/м | | |
|--------------|--|---------------------------|-------|-------|
| | | H_c | M_s | M_r |
| ШХ15 | Состояние поставки | 0,848 | 1115 | 780 |
| | Закалка от 850 °С, без отпуска | 4,75 | 1165 | 713 |
| Углеродистая | С = 0,52 | 0,487 | 1630 | 749 |
| | С = 0,69 | 0,502 | 1620 | 883 |
| | С = 0,99 | 0,598 | 1506 | 792 |
| | С = 1,73 | 1,000 | 1520 | 796 |

По своим магнитным параметрам использованная для анализа сталь ШХ15 охватывает диапазон изменения свойств конструкционных сталей.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что результаты расчета зависимости $\chi(H)$ по формулам (1), (4), (5) близки к результатам эксперимента. Это подтверждают и результаты (рис. 3) статистической обработки связи между рассчитанными и измеренными значениями магнитной восприимчивости стали ШХ15 на кривых Столетова.

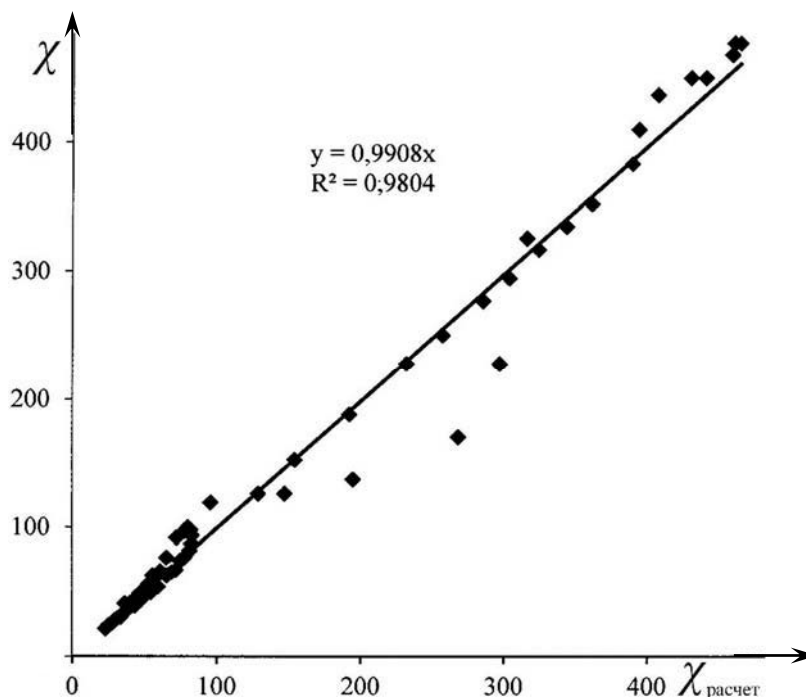


Рис. 3. Корреляционное поле между результатами измерения значений магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 на кривых Столетова и их расчета по формулам (1), (4), (5) по данным, приведенным на рис. 2

Коэффициент корреляции между ними превысил значение 0,99, а среднеквадратическое отклонение составило 8,7 %. Таким образом, применение формул (4) и (5) совместно с формулой (1) исключает необходимость измерения параметров χ_a и M_c для расчета зависимости $\chi(H)$ на кривой Столетова сталей. Значения χ могут быть рассчитаны лишь по величинам H и H_c , M_s и M_r стали, измеренных на предельной петле гистерезиса. Данные о H_c , M_s и M_r почти всех известных сталей приведены в литературе. Это позволяет использовать формулы (4) и (5) совместно с формулой (1) для анализа влияния магнитных свойств материалов на характер зависимости $\chi(H)$ в разных условиях намагничивания.

В качестве **примера применения разработанных формул** проведем анализ влияния содержания углерода в стали на зависимости $\chi(H)$. Результаты

расчета этих зависимостей представлены на рис. 4. Для расчета использованы данные [5] о магнитных свойствах углеродистых сталей.

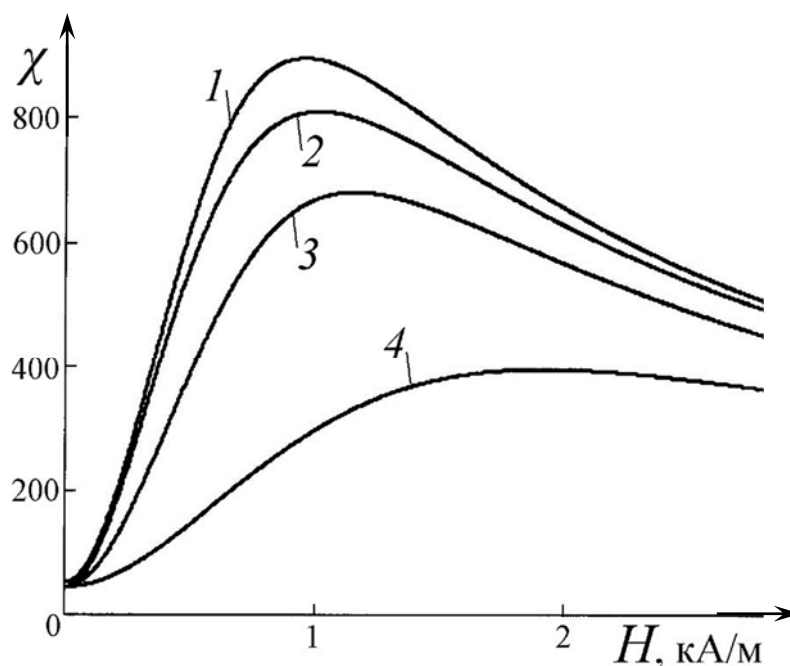


Рис. 4. Результаты расчета по формулам (1), (4), (5) кривых Столетова углеродистых сталей с магнитными свойствами по таблице [5]: 1–4 – соответствуют содержанию углерода 0,52 %; 0,69 %; 0,99 % и 1,73 %

Анализ представленных на рис. 4 зависимостей $\chi(H)$ углеродистых сталей показал, что величину $\chi > 600$ в диапазоне полей $0,5 \leq H, \text{ кА/м} \leq 2$ обеспечивает сталь с содержанием углерода $C \leq 0,69 \%$.

В приведенном примере применение разработанных формул позволило обоснованно выбрать оптимальную по магнитным свойствам углеродистую сталь для электротехнического сердечника, используемого в заданном диапазоне намагничивающих полей. При этом анализ был проведен только на основании справочных данных без изготовления образцов и трудоемких прецизионных измерений с их применением.

Выводы. В результате исследований обоснована правомерность использования в технических расчетах кривой $\chi(H)$ Столетова сталей формул (1), (4), (5) для расчета их H_c , M_r и M_s , измеренных на предельной петле гистерезиса. Возможность применения разработанных формул проиллюстрирована обоснованным выбором оптимального по магнитным свойствам материала стального сердечника только на основании общедоступных справочных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 8.377–80.** Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. – Москва: Изд-во стандартов, 1986. – 21 с.
2. Магнитные измерения / Е. Т. Чернышев [и др.]. – Москва: Изд-во стандартов, 1969. – 248 с.
3. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурок. – Екатеринбург: Урал. отд-ние РАН, 2005. – 218 с.
4. **Тикадзуми, С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – Москва: Мир, 1987. – 419 с.
5. **Михеев, М. Н.** Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М. Н. Михеев, В. М. Морозова. – Москва: ОНТИ по приборостроению ЦНИИКА, 1964. – 46 с.
6. **Сандомирский, С. Г.** Расчет кривой Столетова конструкционных сталей по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2022. – № 1. – С. 18–23.
7. **Сандомирский, С. Г.** Расчет основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 54–57.
8. **Мельгуй, М. А.** Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов / М. А. Мельгуй, Э. А. Шидловская // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 10–18.
9. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: Спектр, 2017. – 248 с.

E-mail: sand_work@mail.ru.