

Barakhoyev Rashid Yunusovich (Public Company «Interregional Grid Company of North Caucasus», Cherkessk, Russia) – Director of Branch «Energosbyt»

Dzhendubayev Eduard Abrek-Zaurovich (North-Caucasian Federal University, Cherkessk, Russia) – Student

The article proposes the mathematical model of a system consisting of a classic double-fed machine with self-excitation from capacitors (a generator) and series capacitive stabilization of voltage. The model is developed using the SimPowerSystems package. The specific features of the generator voltage regulation characteristic are revealed for different capacitances of the series capacitive voltage stabilization devices and at different load power factor values. The curves of dynamic operating modes triggered by abrupt increase and decrease of load and during a two-phase short-circuit fault are given. The calculated and experimental generator voltage regulation characteristics are presented, which corroborate adequacy of the proposed mathematical model.

Key words: double-fed machine, series capacitive voltage stabilization, capacitive self-excitation, computer-aided designing, SimPowerSystems, MATLAB

REFERENCES

1. Balagurov V.A., Galteyev F.F. *Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami* (Electric generators with asynchronous generators). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 280 p.
2. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskiye mashiny* (Contactless electric machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1990, 416 p.
3. Alyushin G.N., Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory povyshennoi chastoty* (Asynchronous generators constant frequency). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 1974, 352 p.
4. Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory avtonomnykh sistem* (Asynchronous generators of autonomous systems). Moscow, Publ. «Znak», 1998, 288 p.
5. Barakhoyev R.Yu., Dzendubayev E.A.-Z. *Eksperimental'nye issledovaniya posledovatel'noi emkostnoi stabilizatsii... – XV Mezhdunarod. konf. «Elektromekhanika, elektrotekhnologii,*

elektrotekhnicheskiye materialy i komponenty» (Experimental studies of serial capacitive stabilization... XV Intern. Conf. «Electromechanics, electrotechnologies, electrotechnical equipment and components». Alushta, 21–27 September 2014, pp. 303–305.

6. Dzhendubayev A.-Z.P., Barakhoyev R.Yu., Dzhendubayev Z.A.-Z. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 7, pp. 46–51.

7. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektricheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* (Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink). St. Petersburg, Publ. «Piter»; Moscow, Publ. «DMK-press», 2008, 288 p.

8. Barakhoyev R.Yu. *Materialy VII Mezhdunarod. nauchnoi konf. «Tekhnicheskiye i tekhnologicheskkiye sistemy* (Proc. of VII Intern. scientific conf. «Technical and technological systems»). Krasnodar, 2015, pp. 89–94.

* * *

Электричество, 2016, № 12, с. 39–43.

Расчет намагниченности сталей на частных петлях гистерезиса по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса

САНДОМИРСКИЙ С.Г.

На основании результатов исследований взаимосвязей между магнитными параметрами сталей скорректирована интерполяционная формула для описания изменения намагниченности сталей на симметричных частных петлях гистерезиса по основным магнитным параметрам материала – коэрцитивной силе, намагниченности технического насыщения и остаточной намагниченности, измеренным на предельной петле гистерезиса. Обоснована правомерность и приведен пример ее использования в технических расчетах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ферромагнитные стали, намагничивание, частные петли гистерезиса, расчет, интерполяционная формула

Ферромагнитные свойства сталей проявляются в том, что при изменении магнитного поля H их намагниченность M изменяется нелинейным и неоднозначным образом – по кривой намагничивания и петле гистерезиса [1]. Основными магнитными параметрами сталей, приводимыми в справочной литературе, являются их коэрцитивная сила H_c , намагниченность M_s технического насыщения и остаточная намагниченность M_r , измеренные на предельной петле гистерезиса. Но электро-

технические изделия из сталей (сердечники зондов, трансформаторов, датчиков) обладают размагничивающим фактором [1, 2]. Поэтому материал изделий перемагничивается по частным петлям магнитного гистерезиса, которые характеризуются максимальной напряженностью H_m намагничивающего поля и максимальной намагниченностью M_m (рис. 1). Не существует точной аналитической формы записи функции $M(H)$ на предельной (кривая 1) и частных (2) петлях гистерезиса с учетом процессов

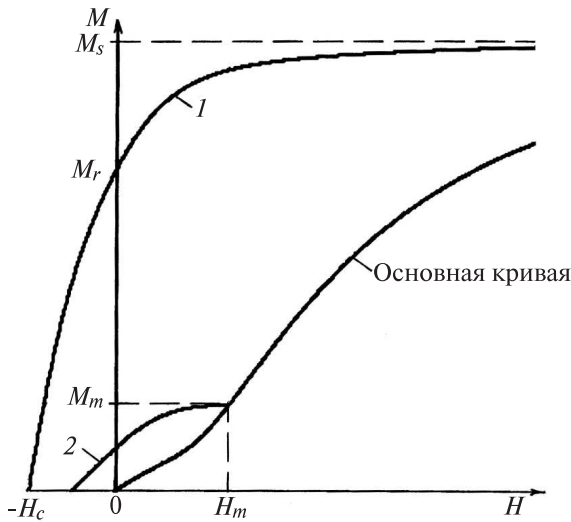


Рис. 1

формирования, роста, переориентации магнитных доменов. Достоверная интерполяция зависимости $M(H)$ не сложной алгебраической функцией позволит исключить громоздкие итерационные расчеты и графические построения при анализе распределения поля и намагниченности в ферромагнитных телах.

Важность построения такой функции обусловлена и тем, что изменения намагниченности сталей на частных петлях магнитного гистерезиса используются в качестве параметра контроля напряженного состояния трубопроводов и стальных конструкций [3–5]. Исследователи пришли к выводу, что элементы соответствующим образом определенных матриц магнитных переменных, основанных на измерении семейства частных петель гистерезиса, более чувствительны к напряжениям в конструкции, чем любой из традиционных параметров, измеренных на предельной петле гистерезиса [3, 4].

Цель статьи: разработка достоверной формулы, описывающей изменение намагниченности сталей на частных петлях гистерезиса по основным магнитным параметрам материала — коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r , измеренным на предельной петле гистерезиса; обоснование того, что все «специфичные» изменения намагниченности сталей на частных петлях магнитного гистерезиса обусловлены только максимальной напряженностью намагничивающего поля и изменениями параметров предельной петли гистерезиса.

Эксперименты [6] показали, что наиболее точно зависимость $M(H, H_m)$ сталей на ветвях частных петель гистерезиса описывает формула [7], имеющая следующую компактную запись (знак «+» относится к нисходящей ветви, знак «-» — к восходящей):

$$M = \chi_a \frac{H_c^2 H}{H^2 + H_c^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k H_c^2} \times \left[2 \arctg \frac{H_c \pm H}{H_0} - \sum_{n=0}^1 \arctg \frac{H_c + (-1)^n H_m}{H_0} \right], \quad (1)$$

где M — намагниченность материала в поле H на ветви петли гистерезиса после намагничивания в поле H_m ; $K_s = M_r / M_s$; $T = \text{tg}(\pi K_s / 2)$; $H_0 = H_c / T$; $k = \frac{M_s \arctg(2T)}{\pi(M_c - \chi_a H_c / 2)}$; χ_a — начальная магнитная восприимчивость; M_c — намагниченность по основной кривой намагничивания при $H_m = H_c$.

Совокупность вершин частных петель гистерезиса [формула (1) при $H = \pm H_m$] представляет собой основную кривую намагничивания стали [7]:

$$M_m = \chi_a \frac{H_c^2 H_m}{H_m^2 + H_c^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k H_c^2} \times \sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg \frac{H_c + (-1)^n H_m}{H_0}. \quad (2)$$

Однако применение (1) при расчете $M(H, H_m)$ невозможно из-за присутствия в (1) параметра M_c , отсутствующего в справочниках по магнитным свойствам сталей. Кроме того, значения χ_a сталей в литературе приводятся реже, чем H_c , M_r и M_s . Результаты измерений χ_a не всегда достоверны — следствие того, что измерение χ_a надо проводить на термически размагниченном материале [8]. Не допустимы повторные измерения χ_a на образцах, использованных для магнитных измерений.

Значения χ_a и M_c удалось выразить через M_r и H_c [9, 10]. Для этого использованы взаимосвязи между магнитными параметрами сталей. Так, в [11] обоснована правомерность использования для современных сталей эмпирической формулы Гумлиха и Шмидта, связывающей максимальную магнитную проницаемость μ_m сталей с их параметрами H_c и M_r :

$$\mu_m \approx (0,476 + 0,0712\tau H_c) M_r / H_c, \quad (3)$$

где размерный множитель $\tau = 1 \text{ м/кА}$.

В [9, 10] на основании экспериментов [6, рис. 7–9] и результатов, представленных в [12, рис. 4–9], использована связь между χ_a и μ_m сталей:

$$\chi_a \approx (\mu_m / 3) - 1. \quad (4)$$

На основании (3) и (4) для расчета χ_a и M_c в [9, 10] приведены формулы:

$$M_c \approx 0,67(0,476 + 0,0712\tau H_c) M_r; \quad (5)$$

$$\chi_a \approx [0,33(0,476 + 0,0712\tau H_c) M_r / H_c] - 1. \quad (6)$$

По формулам (1), (5) и (6) зависимость $M(H)$ на ветвях частных петель гистерезиса сталей может быть рассчитана по H_m и значениями их H_c , M_s и M_r .

Исследования [13–16] показали, что формулы (5) и (6) требуют уточнения. Анализ [13] результатов измерения в [17] H_c , M_r и μ_m множества разных сталей показал, что лучшую, чем (3), точность расчета μ_m обеспечивает формула:

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r / H_c. \quad (7)$$

Средняя относительная погрешность $\bar{\delta}$ расчета μ_m сталей по (7) менее 10%. Это в 1,58 раза меньше погрешности расчета μ_m по (3) и меньше суммы погрешностей измерения по стандартным методикам [8] параметров, входящих в (7).

В [14, 15] установлено, что соотношение (4) нашло подтверждение для сталей, у которых $2 \text{ кА/м} \leq H_c \leq 7,4 \text{ кА/м}$. Данные из [12], на основании которых (4) в [9, 10] распространено на область меньших значений H_c , оказались недостоверны. Это явилось следствием того, что эксперименты по влиянию температуры отжига сталей на их магнитные свойства, результаты которых обобщены в [12] и использованы в [9, 10], проведены в открытой магнитной цепи на образцах с размагничивающим фактором $N = 0,00172 \div 0,002$. Недопустимость использования результатов измерения μ_m и μ_a материала образцов в открытой магнитной цепи показана в [18].

С учетом (7) и [14, 15] в [16] установлена достоверная связь между μ_a , M_r и H_c сталей:

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c}) H_c}. \quad (8)$$

Результаты статистического анализа связи достоверных результатов измерения μ_a в [17] с результатами его расчета по (8) показали [16], что формулу (8) можно использовать для расчета μ_a сталей по значениям H_c и M_r . Значение $\bar{\delta} \approx 10,7\%$ при расчете μ_a по (8) меньше суммы погрешностей из-

мерения по стандартным методикам [8] параметров, входящих в (8).

С учетом (7) и (8) в расчетах зависимости $M(H)$ намагниченности на ветвях частных петель гистерезиса сталей совместно с формулой (1) вместо формул (5), (6) следует использовать формулы:

$$M_c \approx 0,67[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r; \quad (9)$$

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c}) H_c} - 1. \quad (10)$$

Для обоснования правомерности использования формул (1), (9) и (10) для расчета изменения $M(H, H_m)$ намагниченности сталей на частных петлях гистерезиса на рис. 2 результаты расчета по ним сопоставлены с результатами расчета зависимости $M(H, H_m)$ по формуле (1) [7], использующей пять магнитных параметров (H_c , M_s , M_r , χ_a и M_c), и результатами экспериментального измерения значений M при разных H и H_m в [6, рис. 10]. Для сопоставления расчета и эксперимента использована сталь ШХ15 в состоянии поставки, имеющая следующие магнитные параметры [6, таблица]: $H_c = 848 \text{ А/м}$, $M_s = 1115 \text{ кА/м}$, $M_r = 780 \text{ кА/м}$, $\chi_a = 110$ и $M_c = 290 \text{ кА/м}$. На рис. 2, а $H_m = 8,37 \text{ кА/м}$; б — $1,97 \text{ кА/м}$; в — $1,04 \text{ кА/м}$; г — $0,87 \text{ кА/м}$; × — эксперимент [6]; — — расчет по (1) с использованием результатов [6]; ---- — расчет по (1), (9) и (10) с использованием результатов измерения H_c , M_s , M_r стали ШХ15 [6].

Представленные на рис. 2 данные показывают, что результаты расчета зависимости $M(H, H_m)$ по (1), (9) и (10) практически совпадают с результатами эксперимента и результатами расчета этой зависимости по формуле (1), использующей для расчета результаты измерения пяти, а не трех магнитных параметров.

Таким образом, применение формул (8) и (9) совместно с формулой (1) исключает необходимость использования параметров χ_a и M_c для расчета намагниченности сталей на частных петлях магнитного гистерезиса. Значения $M(H, H_m)$ на

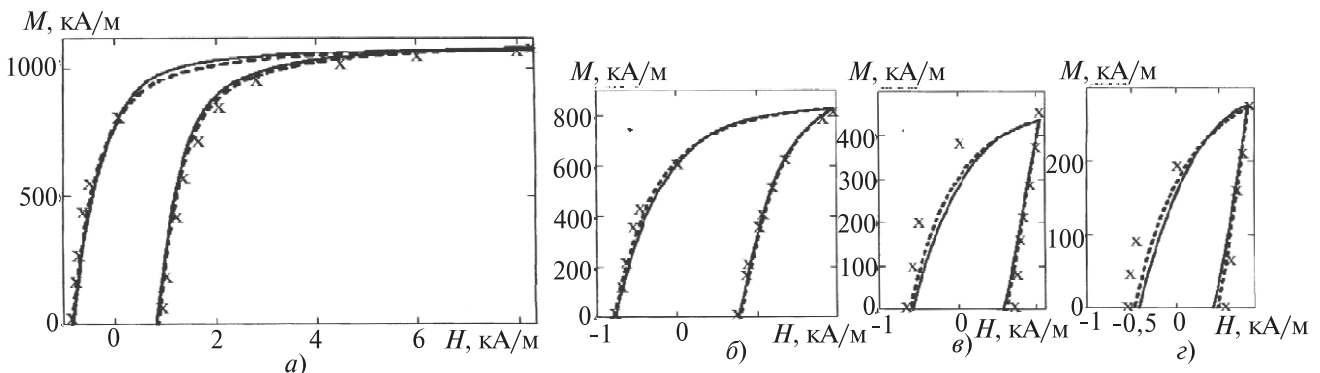


Рис. 2

любой частной петле гистерезиса могут быть с высокой достоверностью (определяемой достоверностью формул (7) и (8), обоснованной в [13–16]) рассчитаны лишь по H_c , M_s и M_r стали на предельной петле гистерезиса и значению H_m . Данные о значениях H_c , M_s и M_r почти всех известных сталей приведены в справочной литературе.

В качестве примера реализации такой возможности на рис. 3 приведены результаты расчета зависимостей $M(H, H_m)$ материала сердечников в форме эллипсоидов вращения с разным отношением λ осей ($\lambda = 5, 12$ и 20) из стали 30, отожженной при 400°C после закалки от 860°C ($H_c = 995$ А/м, $M_s = 1643$ кА/м, $M_r = 1145$ кА/м [17, табл. 1.1]), перемагничиваемых во внешнем магнитном поле напряженностью $H_e = 5$ кА/м. Размагничивающие факторы N анализируемых эллипсоидов вращения, вычисленные по классической формуле [2]:

$$N(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right], \quad (11)$$

составили, соответственно, 0,054; 0,015 и 0,00675.

Максимальные значения H_m внутреннего поля анализируемых эллипсоидов были найдены совместным численным решением уравнения (2) и классического уравнения для расчета напряженности H_m внутреннего поля в ферромагнитном теле, помещенном во внешнее магнитное поле напряженностью H_e [1, 2]:

$$H_m = H_e - NM. \quad (12)$$

Для анализируемых эллипсоидов значения H_m составили, соответственно, 481, 827 и 1145 А/м. Полученные результаты (рис. 3) показывают, что форма частных петель гистерезиса, по которым перемагничивается материал эллипсоида во внешнем поле заданной амплитуды, радикально зависит от относительного размера λ эллипсоида. Без разработанных формул для получения количественной оценки формы частных петель гистерезиса анализируемых

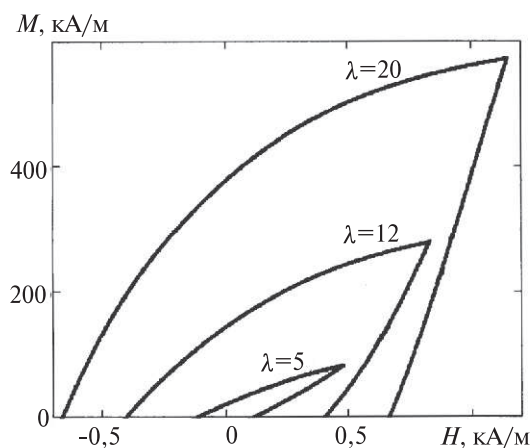


Рис. 3

эллипсоидов пришлось бы их изготавливать и проводить трудоемкие прецизионные измерения.

С использованием разработанных формул и формул [2] для расчета размагничивающих факторов ферромагнитных тел исследователь может проанализировать любые частные петли гистерезиса сердечников простой геометрической формы из любых материалов, магнитные параметры H_c , M_s и M_r которых приведены в справочной литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1956, 784 с.
2. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. — Минск: Беларуская навука, 2015, 244 с.
3. Tomás I. Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials. — Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 268, iss. 1–2, 2004, pp. 178 – 185.
4. Vertesy G., Tomás I., Meszaros I. Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing. — Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 310, iss. 1, 2007, pp. 76–82.
5. Горкунов Э.С., Якушенко Е.И., Задворкин С.М., Мушников А.Н. Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей. — Физика металлов и металлургия, 2015, т. 116, № 2, с. 156–164.
6. Мельгуй М.А., Шидловская Э.А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов. — Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 10–18.
7. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков. — Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 3–10.
8. ГОСТ 8.377–80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1986, 21 с.
9. Сандомирский С.Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в открытой магнитной цепи. — Дефектоскопия, 1997, № 8, с. 50–59.
10. Сандомирский С.Г. Расчет кривой намагничивания и частных петель гистерезиса ферромагнитных материалов по основным магнитным параметрам. — Электричество, 2010, № 1, с. 61–64.
11. Сандомирский С.Г. Расчет остаточной намагниченности сталей по результату измерения коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости. — Контроль. Диагностика, 2010, № 9, с. 38–41.
12. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980, 184 с.
13. Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Часть 1. Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса. — Контроль. Диагностика, 2013, № 12 (186), с. 33–38.
14. Сандомирский С.Г. Статистический анализ взаимосвязи между магнитной проницаемостью и коэрцитивной силой сталей. — Электричество, 2010, № 12, с. 60–63.
15. Сандомирский С.Г. Оценка начальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе и остаточной намагниченности. — Сталь, 2011, № 9, с. 57–60.
16. Сандомирский С.Г. Анализ структурной чувствительности начальной магнитной проницаемости сталей. — Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2014, № 6, с. 29–33.
17. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2005, 218 с.
18. Сандомирский С.Г. Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи. — Измерительная техника, 2010, № 9, с. 57–61.

Автор: Сандомирский Сергей Григорьевич окончил физический факультет Белорусского государственного университета в 1978 г. Докторскую диссертацию «Магнитный контроль механических свойств

движущихся малогабаритных изделий» защитил в 1993 г. Доктор технических наук, главный научный сотрудник Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No.12, pp. 39–43.

Calculating of Magnetization of Steels in Partial Hysteresis Loops Based on the Major Hysteresis Loop Main Magnetic Parameters

SANDOMIRSKII Sergei Grigor'yevich (Unified Institute of Automobile Construction, Belarus National Academy of Sciences, Minsk, Belarus') – Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

The interpolation formula for describing the change of steel magnetization degree in symmetrical partial hysteresis loops is modified based on the results from studying interrelations between the magnetic parameters of steels. The material's main magnetic parameters from which the change of steel magnetization degree is determined according to the formula include the coercive force, magnetization at the technical saturation level, and residual magnetization, all measured on the major hysteresis loop. The validity of the formula is substantiated, and an example of using it in engineering calculations is given.

Key words: *ferromagnetic steels, magnetization, partial hysteresis loops, calculation, interpolation formula*

REFERENCES

1. **Bozort R.** *Ferromagnetizm (Ferromagnetism)*. Moscow, Publ. «Inostrannaya literatura», 1956, 784 p.
2. **Sandomirskii S.G.** *Raschet i analiz razmagnichivayushchego faktora ferromagnitnykh tel (The calculation and analysis of the demagnetization factor of ferromagnetic bodies)*. Minsk, Publ. «Belaruskaya navuka», 2015, 244 p.
3. **Tomás I.** Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials. – *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 268, is. 1–2, 2004, pp. 178 – 185.
4. **Vertesy G., Tomás I., Meszaros I.** Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing. – *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 310, is. 1, 2007, pp. 76 – 82.
5. **Gorkunov E.S., Yakushenko E.I., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N.** *Fizika metallov i metallovedeniye – in Russ. (Physics of Metals and Metallography)*, 2015, vol. 116, No. 2, pp. 156–164.
6. **Mel'gui M.A., Shidlovskaya E.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Defection)*, 1987, No. 11, pp. 10–18.
7. **Mel'gui M.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Defection)*, 1987, No. 11, pp. 3–10.
8. **Standard 8.377–80.** Soft magnetic materials. The measurement procedure in determining the static magnetic characteristics. Moscow, Standards Publishing House, 1986, 21 p.
9. **Sandomirskii S.G.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Detection)*, 1997, No. 8, pp. 50–59.
10. **Sandomirskii S.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 1, pp. 61–64.
11. **Sandomirskii S.G.** *Kontrol'. Diagnostika – in Russ. (Control. Diagnostics)*, 2010, No. 9, pp. 38–41.
12. **Mel'gui M.A.** *Magnitnyi kontrol' mekhanicheskikh svoystv staley (Magnetic control of the mechanical properties of steels)*. Minsk, Publ. «Nauka i tekhnika», 1980, 184 p.
13. **Sandomirskii S.G.** *Kontrol'. Diagnostika – in Russ. (Control. Diagnostics)*, 2013, No. 12(186), pp. 33–38.
14. **Sandomirskii S.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 12, pp. 60–63.
15. **Sandomirskii S.G.** *Stal' – in Russ. (Steel)*, 2011, No. 9, pp. 57–60.
16. **Sandomirskii S.G.** *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – in Russ. (Factory laboratory. Diagnosis materials)*, 2014, No. 6, pp. 29–33.
17. **Bida G.V., Nichipuruk A.P.** *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley (Magnetic properties of the heat-treated steels)*. Ekateringburg, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 2005, 218 p.
18. **Sandomirskii S.G.** *Izmeritel'naya tekhnika – in Russ. (Measuring equipment)*, 2010, No. 9, pp. 57–61.