

## КОМПЛЕКСНАЯ ДЕМАГНЕТИЗАЦИЯ ТРУБ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

С.А. Волохов<sup>1</sup>, канд.техн.наук, П.Н. Добродеев<sup>1</sup>, канд.техн.наук, Г.И. Мамин<sup>2</sup>, канд.техн.наук,

<sup>1</sup> – Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,

ул. Индустриальная, 19, а/я 72, Харьков, 61106, Украина,

<sup>2</sup> – Ассоциация «Харьковнефтемаш»,

ул. Маршала Конева, 21, Харьков, 61001, Украина.

*Исследованы избирательность и эффективность методов демагнетизации состыкованных для сварки намагниченных труб большого диаметра. Установлено, что комплексная демагнетизация труб при ремонтных работах на магистральных трубопроводах, заключающаяся в последовательном использовании размагничивания и компенсации, позволяет надежно снизить магнитное поле в зоне электродуговой сварки до уровня, не оказывающего вредного влияния на сварочный процесс. Библ. 9, табл. 2, рис. 6.*

**Ключевые слова:** магистральные трубопроводы, электродуговая сварка, демагнетизация, размагничивание, компенсация, эффективность.

**Введение.** Намагниченность магистральных трубопроводов, прошедших внутритрубную магнитодиагностику, при их последующем ремонте с применением электродуговой сварки создает в сварочном зазоре магнитное поле, которое затрудняет сварочный процесс, порой делая его просто невозможным вследствие ярко выраженного эффекта «магнитного дутья» дуги. При сварке намагниченных труб нельзя получить хорошее качество сварного шва, что приводит к снижению ресурса трубопровода [1,8]. Магнитная индукция в разделке состыкованных для сварки труб может достигать 100–150 мТл и характеризуется неравномерным распределением по окружности, а максимальный уровень магнитного поля, не оказывающего существенного влияния на процесс ручной электродуговой сварки, составляет порядка 6 мТл [1,6]. Поэтому демагнетизация зоны сварки является обязательной технологической операцией и ее эффективность должна составлять не менее 25. Под эффективностью демагнетизации в настоящей статье понимается отношение максимальных значений магнитной индукции исходного поля и оставшегося после демагнетизации.

Наиболее значимым фактором, определяющим эффективность метода демагнетизации, является избирательность метода к пространственному распределению (спектру) магнитного поля, то есть способность привести в соответствие пространственные распределения магнитного поля объекта и средства демагнетизации. Например, при размагничивании остаточно намагниченной конструкции этого можно достичь, разрушив имеющуюся остаточную намагниченность перемагничиванием материала конструкции до насыщения, и наведя новую, пространственное распределение которой будет обусловлено полем используемого средства демагнетизации. В дальнейшем при использовании этого средства пространственные структуры размагничиваемого и размагничивающего полей будут идентичными автоматически. Однако, например, при классическом (одношаговом) статическом размагничивании напряженность поля размагничивающего импульса всегда меньше напряженности поля, создавшего в предыстории остаточную намагниченность. Поэтому соответствия пространственных структур магнитных полей ожидать не следует, и эффективность демагнетизации может оказаться недостаточной.

В других случаях, например, при наличии индуцированной намагниченности или поля от «дальней» намагниченности также может быть не достигнуто необходимое соответствие пространственных распределений магнитных полей изделия (в нашем случае трубы) и средства демагнетизации вне зависимости от применяемого метода.

При создании технических объектов с минимальным уровнем внешнего магнитного поля авторами в свое время была предложена и практически реализована концепция последовательного применения методов и средств демагнетизации от простых к сложным, с текущим контролем достигнутого результата на каждом этапе [7,9], что позволяет достичь требуемой эффективности с минимальными затратами материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Этот подход предлагается использовать при демагнетизации труб. То есть в случае недостаточной избирательности какого-либо одного метода целесообразно использовать комплексную демагнетизацию, например, комбинацию

размагничивания и компенсации. При комплексном использовании нескольких методов демагнетизации результирующая эффективность равна произведению (а не сумме) эффективностей примененных методов. Таким образом, если эффективность каждого метода в отдельности оценивается на уровне  $5 \div 10$ , то комплексное использование двух методов может дать эффективность демагнетизации порядка  $25 \div 100$ , что уверенно обеспечит допустимый для электросварки уровень магнитного поля.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования эффективности методов размагничивания и компенсации труб большого диаметра и анализ возможности их комплексного применения в технологии электросварки труб магистральных трубопроводов.

**Методы демагнетизации трубопроводов.** Из всего разнообразия методов демагнетизации [7] наиболее приемлемыми для труб магистральных трубопроводов являются методы размагничивания и компенсации. Основное преимущество методов размагничивания заключается в том, что демагнетизация производится до сварки, а электрическая обмотка размагничивающего устройства после демагнетизации демонтируется и не мешает сварщику. Основное преимущество метода компенсации заключается в относительно простом управлении величиной компенсирующего магнитного поля, что позволяет постоянно поддерживать допустимый уровень поля в зоне сварки даже по состоянию металла в сварочной ванне [1].

К применяемым на практике методам размагничивания относятся методы статического и динамического размагничивания. Их действие основано на изменении доменной структуры ферромагнитного материала и переходе его в размагниченное или близкое к нему состояние. При моделировании процессов перехода ферромагнетика от одного магнитного состояния в другое обычно используют теорию петли гистерезиса [5] или планиметрическую модель гистерезиса (план Прейзаха) и метод фазовых диаграмм [2]. Размагниченное состояние – это точка 0 в центре предельной петли гистерезиса или начало координат на фазовой диаграмме, в которых магнитная индукция  $B = 0$  и напряженность поля  $H = 0$ .

По определению (согласно ДСТУ 2725-94. Материалы магнитные. Термины и определения.) статическое размагничивание в классическом виде осуществляется при помощи внешнего магнитного поля, которое приводит намагниченность тела к такому значению, что при устранении поля она становится равной нулю. В приведенном выше определении метод получил название одношагового статического размагничивания, так как предусматривает использование одного размагничивающего импульса магнитного поля, равного релаксационной коэрцитивной силе. Результатом развития метода стало многоступенчатое статическое размагничивание, в котором дополнительно используются опрокидывающий и стабилизирующий импульсы магнитного поля [3].

Динамическое размагничивание осуществляется воздействием на трубу знакопеременным периодическим магнитным полем, амплитуда напряженности которого уменьшается от значения, соответствующего намагниченности технического насыщения, до нуля.

Компенсация – это метод снижения магнитного поля в заданной области пространства с помощью компенсирующего магнитного поля, создаваемого специальными компенсационными устройствами или системами компенсации. Магнитное поле компенсационного устройства также в определенной мере изменяет доменную структуру ферромагнетика, то есть переводит его в другое магнитное состояние. Поэтому при отключении компенсационного устройства ферромагнетик может не возвратиться в исходное состояние из-за наличия магнитного гистерезиса. А для достоверного сравнения результатов разных методов демагнетизации желательно иметь одинаковое исходное магнитное состояние, что может быть обеспечено, например, путем возврата кривой намагничивания в предыдущую точку поворота в соответствии с [6].

**Условия и методика эксперимента.** Экспериментальные исследования характера намагниченности магистрального трубопровода и процесса его демагнетизации методами размагничивания и компенсации проведены на физической модели, выполненной в виде трубы из стали 17Г1С длиной 10 м, диаметром 1220 мм, толщиной стенки 16 мм. Эта труба была вырезана из действующего нефтепровода после внутритрубной диагностики магнитным снарядом-дефектоскопом, установлена на подставки и разрезана пополам. На расстоянии 100–150 мм от образовавшегося зазора по обе его стороны была расположена обмотка из провода сечением  $16 \text{ мм}^2$  из  $2 \times 20$  витков, которая питалась постоянным током от сварочного

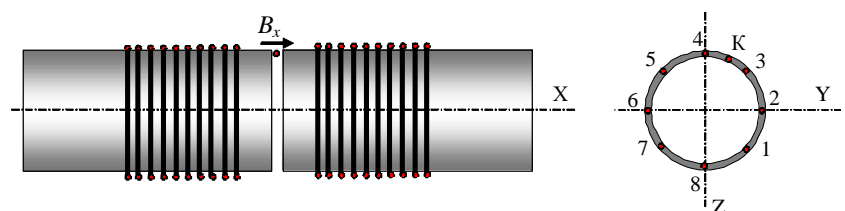


Рис. 1

агрегата. Расположение обмотки на трубе показано на рис. 1, там же показана сетка точек измерений магнитной индукции в зазоре по окружности трубы.

Основное внимание было уделено продольной компоненте магнитной индукции  $B_x$  в сварочном зазоре, так как именно она оказывает силовое воздействие на сварочную дугу и вызывает эффект «магнитного дутья». Измерения магнитной индукции проводились магнитометром типа КРМ-Ц-Т с диапазоном измерений  $\pm 1999$  мТл и относительной погрешностью 2,5%.

К сожалению, после электродной резки торцевые кромки были неровными, величина зазора изменялась по окружности трубы, и измерить его с достаточной точностью не представлялось возможным. Это усложняло исследования, так как теперь неравномерность распределения магнитной индукции  $B_x$  по окружности зазора зависела не только от неравномерной намагниченности, а и от неравномерного зазора. Проблема определения величины зазора была решена следующим образом. В контрольной точке К, которая имела минимальную бугристость, проведены тщательные измерения зазора и определено его среднее значение – 10 мм. С помощью расположенной на трубах обмотки было создано в зазоре небольшое поле (10 мТл), совпадающее по направлению (знаку) с исходным полем труб и названное технологическим. При такой величине и направлении поля после его снятия обеспечивался возврат труб в исходное магнитное состояние. Результаты измерений магнитной индукции  $B_{xt}$  технологического поля приведены в строке 2 табл. 1.

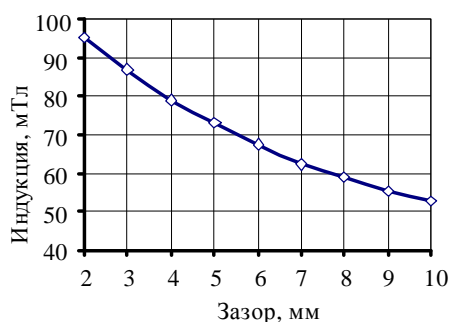
**Таблица 1**

№ тчк.изм.	1	2	3	К	4	5	6	7	8
$B_{xt}$ , мТл	13,3	12,2	11,4	10	11,4	14	13,3	12,2	13,3
$\delta$ , мм	5,2	6,3	7,9	10	7,9	4,3	5,2	6,3	5,2

Допустив (с достаточной достоверностью), что неравномерность распределения в зазоре технологического поля является результатом

неравномерности зазора, получим возможность оценки этой неравномерности. При неизменной намагничивающей силе расчетная зависимость магнитной индукции  $B_{xp}(\delta)$  взята из [4] и показана на рис. 2. Зависимости  $B_{xp}(\delta)$  и  $B_{xt}(\delta)$  подобны и отличаются коэффициентом пропорциональности, который может быть определен при  $\delta=10$ мм (зазор в точке К) и равен  $B_{xp}(10)/B_{xt}(10) = 5,3$ . Теперь значение зазора  $\delta$  для любого значения  $B_{xt}$  можно найти по зависимости  $B_{xp}(\delta)$  при  $B_{xp} = 5,3 \cdot B_{xt}(\delta)$ . Полученные таким образом значения зазора в точках измерений представлены в строке 3 табл. 1 и в строке 2 табл. 2. Среднее значение зазора, определенное как среднее арифметическое его значений в точках измерений, равно 6,5 мм.

Программа исследований предусматривала:



**Рис. 2**

– изучение распределения магнитной индукции  $B_x$  в сварочном зазоре по окружности труб в исходном состоянии намагниченности магнитным дефектоскопом, а также после компенсации и размагничивания;

– определение эффективности различных методов демагнетизации труб: размагничивания (динамического и статического одношагового), компенсации и комплексной демагнетизации размагничиванием и компенсацией.

**Результаты экспериментальных исследований эффективности различных методов демагнетизации.** Распределение исходной магнитной индукции  $B_x$  по точкам измерений дано в строке 3 табл. 2. В строке 4 дано значение индукции  $B_x'$ , приведенное к среднему зазору величиной 6,5 мм по описанным выше

правилам с использованием зависимости  $B_{xp}(\delta)$ , показанной на рис. 2.

**Таблица 2**

№ тчк.изм.	1	2	3	К	4	5	6	7	8
$\delta$ , мм	5,2	6,3	7,9	10	7,9	4,3	5,2	6,3	5,2
$B_x$ , мТл	140	120	110	90	70	80	80	120	140
$B_x'$ , мТл	128	118	120	111	76	68	73	118	128
$B_{xк}$ , мТл	+30	+20	+10	0	-20	-30	-20	+20	+30
$B_{x\delta}$ , мТл	20	19	15	12	14	16	18	19	20
$B_x(40)$ , мТл	+2,4	-0,2	-2,6	-3	-3,6	-3,4	-2,8	-0,2	+2,4

распределена неравномерно. При равномерном зазоре индукция распределена практически столь же

Эти два распределения исходной магнитной индукции показаны также на рис. 3 при неравномерном (кривая, обозначен. "О") и равномерном (кривая, обозначен. "Δ") зазоре. Из табл. 2 и рис. 3 видно, что магнитная индукция по окружности сварочного зазора

неравномерно, как и в исходном варианте с неравномерным зазором, что свидетельствует о неравномерном распределении остаточной намагниченности. В нашем случае эта неравномерность превышает 30% среднего значения индукции.

Метод компенсации применительно к трубам магистральных трубопроводов наиболее просто реализовать, создав компенсирующее магнитное поле обмоткой, намотанной на состыкованные трубы, как это показано на рис. 1. Если неизменны параметры обмотки, зазора и самих труб по окружности, то магнитная индукция, создаваемая обмоткой, будет также неизменной по окружности в любом сечении трубы, в том числе по окружности сварочного зазора. Учитывая значительную неравномерность исходной магнитной индукции от остаточной намагниченности труб, которая показана на рис. 3, не следует ожидать высокой эффективности компенсации.

Результаты измерений магнитной индукции  $B_{\text{хк}}$  результирующего поля при включенной обмотке на оптимальный ток компенсации 200 А приведены в строке 5 табл. 2, а на рис. 4 – распределения исходной индукции  $B_x$  в зазоре остаточно намагниченных труб (кривая, обозначен. "О") и результирующего поля  $B_{\text{хк}}$  при включенной компенсации (кривая, обозначен. "Δ"). По этим данным эффективность компенсации незначительна из-за высокой исходной неравномерности поля в воздушном зазоре и составляет  $\mathcal{E}=140/30=4,7$ . Такой эффективности недостаточно для исключения влияния намагниченности на сварочный процесс, так как допустимый уровень магнитной индукции в зоне сварки не должен превышать 6 мТл [1].

Динамическое размагничивание проводилось с использованием той же обмотки, намотанной на трубах вблизи сварочного зазора. Параметры размагничивания следующие: максимальная н.с. обмотки (первый импульс) – 9,4 кА; декремент затухания импульсов – 1,2; последний импульс н.с. – 0,6 кА; количество импульсов – 20 (по 10 каждой полярности).

Результаты измерения магнитной индукции  $B_{\text{хд}}$  в сварочном зазоре после динамического размагничивания приведены в строке 6 табл. 2, а на рис. 5 – распределения исходной индукции  $B_x$  в зазоре остаточно намагниченных труб (кривая, обозначен. "О") и результирующего поля  $B_{\text{хд}}$  после динамического размагничивания (кривая, обозначен. "Δ").

Из приведенных данных измерений следует, что максимальное значение индукции  $B_x$  снизилось в 7 раз, а неравномерность – в 9 раз. Недостаточно эффективное динамическое размагничивание объясняется наличием «дальней» намагниченности трубы, которую магнитное поле обмотки размагнитить не может, то есть несовпадением пространственных распределений их полей. Однако важным является подтверждение возможности снизить неравномерность в распределении индукции  $B_x$  путем разрушения имеющейся структуры остаточной намагниченности, причем не только по абсолютной величине, но и в относительном значении. Результаты применения статического одношагового размагничивания несколько хуже: снижение индукции  $B_x$  и ее неравномерности примерно в 5 раз. Поэтому данные исследований статического одношагового размагничивания здесь не приводятся и дальше в настоящей статье не используются.

Комплексная демагнетизация в этой работе представлена последовательным использованием методов динамического размагничивания (до сварки) и компенсации (во время сварки).

Результаты эксперимента при последовательном применении этих методов приведены в строке 7 табл. 2 и на рис. 6, где обозначено:  $B_{\text{хд}}$  – индукция в зазоре после динамического размагничивания (кривая 1);  $B_x(40)$  – результирующее поле после динамического размагничивания и последующей



Рис. 3



Рис. 4



Рис. 5

компенсации при токе 40 А в обмотке (кривая 2).

Эффективность компенсации составляет около 6, а общая эффективность размагничивания и компенсации  $\Xi=140/3,6=39$ , что достаточно для исключения вредного влияния магнетизма на сварочный процесс. Схожие результаты получены и при комплексной демагнетизации с использованием статического одношагового размагничивания и компенсации.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что для сильно намагниченных труб необходимая эффективность демагнетизации (не менее 25) может быть достигнута последовательным применением нескольких методов. В рассмотренном случае демагнетизации участка трубопровода на первом этапе проведено его размагничивание, при котором поле в сварочном зазоре снижается примерно в 7 раз и выравнивается неравномерность распределения магнитной индукции по окружности зазора, на втором этапе применена компенсация, которая обеспечивает дальнейшее снижение поля еще примерно в 6 раз.

Такая комплексная демагнетизация, объединяющая статическое размагничивание и компенсацию, внедрена в модернизированных размагничивающих установках типа РУ-М, разработанных авторами, что позволило гарантированно снизить магнитное поле в зоне сварки до уровня, не оказывающего негативного влияния на сварочный процесс.

В настоящее время модернизированные установки типа РУ-М производятся Ассоциацией «Харьковнефтемаш» и используются для реализации промышленной технологии размагничивания труб магистральных трубопроводов в зоне сварки при ремонтных и монтажных работах в полевых условиях с целью исключения эффекта «магнитного дутья» дуги и получения качественного шва.

**Выводы.** Комплексная демагнетизация труб при ремонтных работах на магистральных трубопроводах с использованием электродуговой сварки, заключающаяся в последовательном использовании методов размагничивания и компенсации, обладает высокой эффективностью и позволяет гарантированно снизить магнитное поле в зоне сварки до уровня, не оказывающего негативного влияния на сварочный процесс.

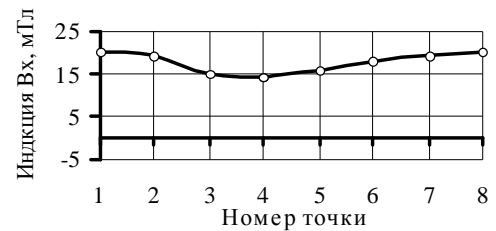


Рис. 6

1. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Мамин Г.И. Размагничивание труб на магистральных трубопроводах для высококачественной сварки // Ремонт, восстановление и модернизация. – 2004. – №10. – С. 11–13.

2. Волохов С.А. Оценка магнитного состояния ферромагнитной конструкции методом фазовых диаграмм // Технічна електродинаміка. – 2005. – №2. – С. 12–17.

3. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Деркач В.В. Устойчивость статически размагниченных состояний ферромагнитной конструкции // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.2. – С. 9–12.

4. Волохов С.А. Электромагнитная обработка труб на магистральных трубопроводах для высококачественной сварки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2002. – Ч.2. – С. 92–95.

5. Зирка С.Е., Мороз Ю.И. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 1. – С. 22–27; – № 2. – С. 7–13.

6. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю. Инверсная модель магнитного гистерезиса // Технічна електродинаміка. – 2010. – №3. – С. 3–7.

7. Розов В.Ю., Пилюгина О.Ю., Лукиков В.С., Добродеев П.Н., Гетьман А.В., Волохов С.А. Введение в демагнетизацию технических объектов // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 55–59.

8. Третьяков И.В., Ригмант М.Б., Щербинин В.Е. Способы повышения качества сварки газопроводов за счет предварительного устранения остаточной намагниченности // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 25–30.

9. Dobrodeiev P., Volokhov S., Kildishev A. Magnetically quiet shipboard-type electrical equipment: methods in design and manufacturing // IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings Nice, France. 28 Sept.-1 Oct. 1998. (Cat. No.98CH36259). IEEE. New York, NY, USA. – 1998. – Vol.3. – Pp. 1468–72.

**С.О.Волохов**<sup>1</sup>, канд.техн.наук, **П.М.Добродєєв**<sup>2</sup>, канд.техн.наук, **Г.І.Мамін**<sup>3</sup>, канд.техн.наук,  
<sup>1,2</sup> – Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,  
вул. Індустріальна, 19, а/с 72, Харків, 61106, Україна,  
<sup>3</sup> – Асоціація «Харківнафтомаш»,  
вул. Маршала Конєва, 21, Харків, 61001, Україна.

*Досліджено вибірність та ефективність методів демагнетизації зістикованих для зварювання намагнічених труб великого діаметру. Встановлено, що комплексна демагнетизація труб при ремонтних роботах на магістральних трубопроводах, яка включає послідовне використання методів розмагнічування і компенсації, дозволяє впевнено знизити магнітне поле у зоні електродугового зварювання до рівня, що не завдає шкідливого впливу на зварювальний процес. Бібл. 9, табл. 2, рис. 6.*

**Ключові слова:** магістральні трубопроводи, електродугове зварювання, демагнетизація, розмагнічування, компенсація, ефективність.

## INTEGRATED DEMAGNETIZATION OF PIPES AT ARC WELDING

**S.A.Volokhov**<sup>1</sup>, **P.N.Dobrodeiev**<sup>1</sup>, **G.I.Mamin**<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup> – Science and Technology of Magnetism of Technical Objects, National Academy of Sciences of Ukraine,  
19 Industrialna st., PO Box 72, Kharkiv, 61106, Ukraine,  
<sup>2</sup> – Association «Kharkovneftemash»,  
21 Marshala Koneva st., Kharkiv, 61106, Ukraine.

*The selectivity and efficacy of methods of demagnetization of joined for welding magnetized large-diameter pipes are investigated. It is determined that integrated demagnetization of pipes during repair works on main pipelines, which represents the sequential use of methods of degaussing and compensation, allows to reliably reduce the magnetic field in the weld area to the level which does not adversely affect the welding process. References 9, tables 2, figures 6.*

**Key words:** main pipelines, arc welding, demagnetization, degaussing, compensation, efficacy.

1. Volokhov S.A., Dobrodeiev P.N., Mamin G.I. Demagnetization of pipes on main pipelines for high quality welding // Remont, vosstanovlenie i modernizatsiia. – 2004. – №10. – Pp. 11–13. (Rus)
2. Volokhov S.A. Evaluation of the magnetic state of ferromagnetic structure using the phase diagrams method // Tekhnichna elektrodynamika. – 2005. – №2. – Pp. 12–17. (Rus)
3. Volokhov S.A., Dobrodeiev P.N., Derkach V.V. Stability of statically demagnetized states of the ferromagnetic structure // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2010. – Vol.2. – Pp. 9–12. (Rus)
4. Volokhov S.A. Electromagnetic processing of pipes on the main pipelines for high quality welding // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2002. – Vol.2. – Pp. 92–95. (Rus)
5. Zirka S.E., Moroz Yu.I. Modelling of magnetic hysteresis based on generalized rules of Madelung // Tekhnichna elektrodynamika. – 1999. – № 1. – Pp. 22–27; – № 2. – Pp. 7–13. (Rus)
6. Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu. Inverse model of magnetic hysteresis // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №3. – Pp. 3–7. (Rus)
7. Rozov V.Yu., Piliugina O.Yu., Lupikov V.S., Dobrodeiev P.N., Getman A.V., Volokhov S.A. Introduction to demagnetization of technical objects // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – 2006. – № 4. – Pp. 55–59. (Rus)
8. Tretiakov I.V., Rigmant M.B., Scherbinin V.E. Ways to improve the quality of welding of gas pipelines through the preliminary removal of the residual of the magnetization // Defektoskopiia. – 2009. – №8. – С. 25–30. (Rus)
9. Dobrodeiev P., Volokhov S., Kildishev A. Magnetically quiet shipboard-type electrical equipment: methods in design and manufacturing // IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings Nice, France. 28 Sept.-1 Oct. 1998. (Cat. No.98CH36259). IEEE. New York, NY, USA. – 1998. – Vol.3. – Pp. 1468–72.

Надійшла 25.01.2012

Received 25.01.2012