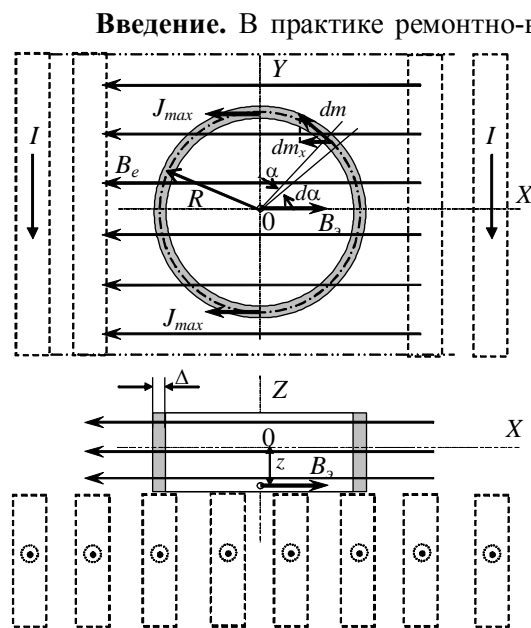


## МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ ЗОНЫ СВАРКИ ВБЛИЗИ ШИНОПРОВОДА

С.А.Волохов<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.В.Деркач<sup>2</sup>, П.Н.Добродеев<sup>3</sup>, канд.техн.наук,  
<sup>1,2,3</sup> – Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,  
 ул. Индустриальная, 19, а/я 72, Харьков, 61106, Украина

*Аналитически и экспериментально исследованы незамкнутые магнитостатические экраны, предназначенные для защиты технологического процесса сварки нагруженных шинопроводов алюминиевых электролизеров от вредного воздействия их магнитного поля. Предложена инженерная методика расчета таких экранов, подтвержденная результатами экспериментальных исследований. Низкая эффективность незамкнутых экранов ограничивает область их возможного использования и стимулирует разработку высокоэффективных средств локальной демагнетизации. Библ. 11, табл. 2, рис. 5.*

**Ключевые слова:** магнитостатические экраны, сварка, демагнетизация.



**Рис. 1**

**Метод расчета.** Методы расчета магнитостатических экранов [1,7,10], справедливые для замкнутых оболочек, мало пригодны для незамкнутых, то есть оболочек, имеющих открытые участки, окна, отверстия, щели [2]. К таким оболочкам относятся и короткие цилиндры с открытыми торцами. Некорректное применение формул для замкнутых экранов к экранам незамкнутым приводит к несоответствию между расчетными и опытными данными, в результате чего реальная эффективность незамкнутых экранов оказывается существенно ниже прогнозируемой, что затрудняет их разработку и применение.

Одним из возможных методов расчета незамкнутого экрана может быть метод, основанный на зависимости экранирующих свойств ферромагнитной оболочки от ее индуктивного (наведенного магнитным полем внешних источников) магнитного момента. Суть его заключается в том, чтобы найти распределение намагниченности  $J$  в экране от индукции  $B_e$  исходного внешнего магнитного поля и определить индукцию  $B_s$  в экранируемой области (внутри экрана) от этой намагниченности. Тогда коэффициент экранирования  $k_s$  и эффективность экранирования  $\mathcal{E}$  соответственно равны

$$k_s = (B_e - B_s) / B_e; \quad \mathcal{E} = 1 / k_s.$$

Наличие двух близких по значению величин в числителе выражения для  $k_s$  накладывает определенные ограничения на область применения метода. Общепринятые допущения в расчетных мето-

дах, связанные с идеализацией геометрии и материала рассчитываемого изделия, приводят к погрешности расчета магнитных величин на уровне нескольких процентов, а при вычитании близких по значениям величин погрешность возрастает тем больше, чем ближе эти значения. Поэтому рассматриваемый метод реально пригоден для экранов с низкой эффективностью, которыми, как показано ниже, и являются короткие ферромагнитные цилиндры с открытыми торцами.

В практически однородном внешнем магнитном поле шинпровода, направленном по поперечной оси цилиндра (рис. 1), намагниченность цилиндра по окружности распределяется, как  $J = J_m \cos \alpha$ . Его элементарный участок объемом  $dV$  будет обладать магнитным моментом

$$dm = J_m \cos \alpha \Delta dL R d\alpha, \quad (1)$$

где  $\Delta$ ,  $L$ ,  $R$  – соответственно толщина, длина и радиус (средний) цилиндра.

Из (1) магнитный момент всего экрана в направлении поперечной оси  $X$  равен:

$$m_x = \pi J_{\max} \Delta LR. \quad (2)$$

На продольной оси  $Z$  цилиндра на расстоянии  $z$  от его центра магнитная индукция  $B_z$  (рис. 1) от намагниченности  $J$  будет направлена по оси  $X$  и равна

$$B_z = 2\mu_0 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{dm_x}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 m_x}{4\pi r^3}, \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние от  $dm$  до точки определения магнитной индукции,  $r = \sqrt{R^2 + z^2}$ , а коэффициент экранирования

$$k_z = 1 - \frac{\mu_0 m_x}{4\pi r^3 B_e}. \quad (4)$$

Индуктивный магнитный момент тела, намагниченного в равномерном внешнем магнитном поле, равен [9]

$$m = JV = k_\mu H_e V, \quad (5)$$

где  $J$  – средняя по объему  $V$  намагниченность материала тела, А/м;  $V$  – объем, ограниченный наружными контурами тела, м<sup>3</sup>;  $H_e$  – напряженность внешнего магнитного поля, А/м;  $k_\mu$  – коэффициент намагниченности,  $k_\mu = \chi_T \cdot k_z$ , где  $\chi_T$  – магнитная восприимчивость тела;  $k_z$  – коэффициент заполнения объема  $V$  ферромагнитным материалом.

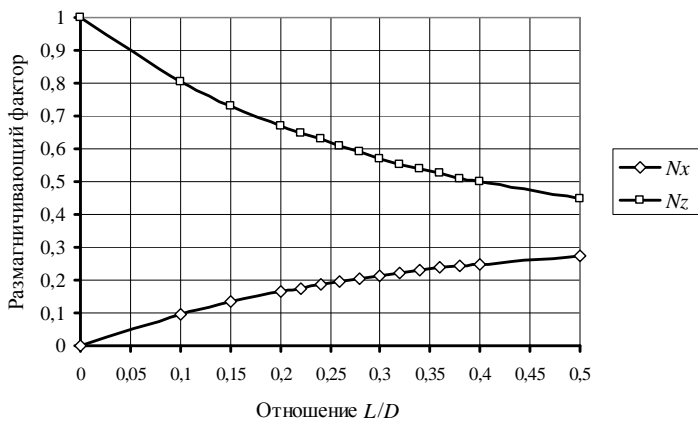


Рис. 2

$N_x + N_y + N_z = 1$ , из которых следует, что  $N_x = (1 - N_z) / 2$ . Он также показан на рис. 2.

При обоснованном выборе толщины экрана, когда насыщение отсутствует, коэффициент заполнения следует принять  $k_z = 1$ . Когда толщина цилиндра  $\Delta \rightarrow 0$  и его материал входит в зону насыщения, коэффициент заполнения снижается. Анализ отраслевых методик расчета индуктивного магнитного момента, материалов [5] и данные собственного опыта позволяют принять следующее выражение для коэффициента заполнения тонкостенных коротких цилиндров:

$$k_{zi} = k_i / (k_i + 1), \quad (6)$$

где  $i = x, y, z$  – соответствующая ось цилиндра;  $k_{x,y} = 2\mu N_x \Delta / R$ ,  $k_z = 0,3\mu N_z \Delta / R$ .

Магнитная восприимчивость тела  $\chi_T = \chi [1 + \chi \cdot N]^{-1}$ , где  $\chi$  – магнитная восприимчивость материала;  $N$  – размагничивающий фактор. При  $N > 0,2$  и  $\chi > 100$ , что характерно для коротких цилиндров из ферромагнитного материала, с погрешностью не более 5% можно считать, что  $\chi_T = N^{-1}$ .

На рис. 2 по материалам [9] построена зависимость размагничивающего фактора  $N_z$  по продольной оси  $Z$  цилиндра от соотношения его размеров  $L/D$ . Размагничивающий фактор по поперечной оси цилиндра определяется известными соотношениями  $N_x = N_y$  и

Таким образом, для коротких открытых с торцов цилиндров из ферромагнитного материала индуктивный магнитный момент по поперечной оси равен:

$$m_x = k_{zx} H_e V / N_x. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получим коэффициент экранирования по поперечной оси цилиндра в окончательном виде

$$k_y = 1 - k_{zx} V / (4\pi N_x r^3). \quad (8)$$

Важным показателем качества магнитостатического экрана является отсутствие насыщения его материала, что обычно обеспечивается значением индукции в экране  $B \leq 1$  Тл. При упрощенном представлении о процессе магнитостатического экранирования можно считать, что магнитный поток внешнего поля с индукцией  $B_e$ , входящий в боковую поверхность цилиндра и равный  $\Phi = (B_e / N_x) D_n L$ , проходит через стенки цилиндра и в его сечении с  $J_{\max}$  равен  $\Phi = B_{\max} \cdot 2\Delta \cdot L$ . Отсюда находим относительную толщину экрана

$$\frac{\Delta}{D_n} = \frac{B_e}{2N_x B_{\max}}. \quad (9)$$

Это выражение может быть получено также сравнением формул (2) и (7).

Соотношение (9) позволяет при проектировании экрана определить его оптимальную толщину, приняв условие  $B_{\max} \leq 1$  Тл, или в цилиндре с известной толщиной оценить значение индукции  $B_{\max}$  и судить о целесообразности его использования в качестве экрана.

**Физическая модель шинопровода электролизера** выполнена в виде соленоида с наружным диаметром 750 мм и длиной 600 мм из 2-х слоев по 17 витков кабеля типа КНРГ сечением  $3 \times 25$  мм<sup>2</sup> диаметром  $d=32$  мм с соединенными последовательно жилами. Обмотка соленоида питалась постоянным током 240 А. Верхняя часть соленоида с установленным на его поверхности цилиндрическим экраном условно показана на рис. 3 (1, 2, 3 – линии измерения магнитной индукции при отсутствии экрана; a, b, c – точки измерений магнитной индукции с экраном и без него).

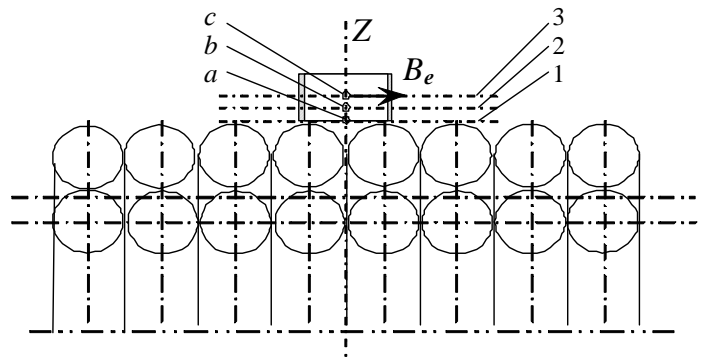


Рис. 3

Магнитная индукция в зоне расположения экрана измерялась магнитометром типа DC Gaussmeter Model 1, AlphaLab Inc, сенсором которого является преобразователь Холла.

Измерениями распределения индукции магнитного поля над моделью шинопровода (по линиям 1, 2 и 3 на рис. 3) при отсутствии экрана установлено, что ее значение равно  $B_e=9,4$  мТл  $\pm 0,2$  мТл, то есть принятое при разработке метода допущение об однородном поле в зоне размещения цилиндрического экрана является приемлемым.

**Объекты исследований.** Сварочные работы на шинопровode электролизера обычно связаны с подсоединением шин или перемычек. Как отмечалось выше, экран не должен мешать доступу электрода к месту сварки и наблюдению за процессом сварки. Поэтому цилиндрический экран должен иметь диаметр не менее 150÷200 мм и длину (высоту) – не более 60÷80 мм, то есть отношение

$$L/D_n = 0,25 \div 0,35. \quad (10)$$

Равенство отношений  $L/D_n$  у оригинала и модели принято первым критерием подобия при выборе экранов для исследований.

Вторым критерием подобия принято равенство у оригинала и модели относительной толщины экрана  $\Delta/D_n$ . Из соотношения (9) с условием  $B_{\max} \leq 1$  Тл получим

$$\Delta/D_n \geq B_e/2N_x. \quad (11)$$

С учетом критериев (10) и (11) для исследований на модели шинопровода электролизера изготовлены цилиндрические экраны, технические данные которых приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

№ экрана	$D_n$ , мм	$D_в$ , мм	$R$ , мм	$L$ , мм	$\Delta$ , мм	$L/D_n$	$\Delta/D_n$	$V$ , см <sup>3</sup>	$N_x$
1	105	95	50	30	10×0,35	0,286	0,033	260	0,208
2	104	95	49,75	-"	9×0,35	0,288	0,030	255	0,209
3	103	95	49,5	-"	8×0,35	0,291	0,027	250	0,2105
4	102	95	49,25	-"	7×0,35	0,294	0,024	245	0,212
5	101	95	49	-"	6×0,35	0,297	0,021	240,4	0,2135
6	100	95	48,75	30	5×0,35	0,300	0,018	235,6	0,215
7	99	95	48,5	-"	4×0,35	0,303	0,014	231	0,216
8	98	95	48,25	-"	3×0,35	0,306	0,011	226,3	0,217
9	97	95	48	-"	2×0,35	0,309	0,007	221,7	0,218

Примечание. Размагничивающий фактор  $N_x$  определен по данным рис. 2.

Экраны изготовлены из ленты электротехнической стали 3411 путем навивки указанного числа слоев с перекрытием последнего слоя на две ширины. Толщина ленты по металлу 0,35 мм, толщина ленты с изоляционным покрытием 0,5 мм. Экраны выбраны с таким расчетом, чтобы можно было исследовать зависимость экранирующих свойств от соотношений  $\Delta/D_n$ .

**Методика выполнения эксперимента.** Проводились измерения индукции в контрольных точках  $a$ ,  $b$  и  $c$  (рис. 3) и магнитного потока в сечении цилиндра с  $J_{max}$ .

Определение экранирующих свойств цилиндров выполнялось следующим образом:

– включалось питание модели шинпровода (240 А), обеспечивающее магнитное поле в зоне расположения экрана;

– согласно рис. 3 экран устанавливался в рабочее положение, и измерялось значение магнитной индукции  $B_{рез}$  при наличии экрана;

– экран удалялся и измерялось исходное значение магнитной индукции  $B_e$  (без экрана);

– коэффициент экранирования определялся как отношение результирующей индукции к исходной:  $k_э = B_{рез}/B_e$ , а эффективность экранирования как  $\mathcal{E} = B_e/B_{рез}$ .

Для определения индукции в сечении экрана с  $J_{max}$  на каждый экран была намотана измерительная обмотка. С помощью микроверметра типа Ф-190 измерялся магнитный поток  $\Phi_{max}$  в указанном сечении экрана при реверсе номинального тока питания модели шинпровода. Магнитная индукция определялась как  $B_{max} = \Phi_{max}/2\Delta L$ .

**Результаты исследований и их обсуждение.** Значения исследуемых параметров, полученные расчетным и опытным путем, приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

№ экрана	№ точки	$\Phi_{max}$ , мкВб	$B_{max}$ , Тл	$\mu$ по ОКН	$k_э$ по (6)	$B_e$ , мТл	$B_{рез}$ , мТл	$\mathcal{E}$ расчет.		$\mathcal{E}$ опыт.			
								$k_э = 1$	$k_э$ по (6)				
1	$a$	74	0,7	4100	0,99	9,6	2,6	3,32	3,24	3,7			
	$b$										4,33	4,19	4,3
	$c$										4,88	4,7	4,8
2	$c$	73	0,77	3500	0,99	9,4	2	4,73	4,55	4,7			
3	$c$	71	0,85	2700	0,98	9,4	2,1	4,53	4,3	4,5			
4	$c$	69	0,94	2000	0,98	9,4	2,2	4,35	4,08	4,2			
5	$a$	66	1,04	1600	0,97	9,6	3	3,0	2,82	3,2			
	$b$										3,78	3,49	3,5
	$c$										4,19	3,83	3,8
6	$c$	61	1,16	1150	0,95	9,4	3	4,04	3,51	3,2			
7	$c$	55	1,31	840	0,91	9,4	3,6	3,93	3,11	2,6			
8	$c$	46	1,52	600	0,85	9,4	4,5	3,83	2,69	2,2			
9	$c$	38	1,81	320	0,67	9,4	5,3	3,73	1,93	1,8			

Первое, что обращает на себя внимание при рассмотрении результатов исследований, – низкий уровень полученных эффективностей экранирования. Из таблицы следует, что на шинпроводе в зоне сварки эффективность экранирования магнитного поля следует ожидать на уровне  $\mathcal{E} = 3 \div 5$  при необходимом уровне демагнетизации в  $5 \div 50$  раз. Таким образом, возможности метода экранирования для локальной демагнетизации шинпроводов электролизеров оказываются ограниченными и в большинстве случаев недостаточными для обеспечения требуемого уровня магнитного поля в зоне сварки. Использо-

вание магнитоэкранных экранов возможно в случаях работы электролизера на пониженном токе и при сварке конструктивных элементов электролизера вблизи токоподводящих шин, где уровень магнитного поля ниже. Как следствие, на объектах с токовыми источниками магнитного поля сохраняется актуальность разработки высокоэффективных средств локальной демагнетизации.

По данным табл. 2 на рис. 4 показана зависимость эффективности экранирования от относительной толщины экрана  $\Theta = f(\Delta/D)$ : 1 – опытная; 2 – расчетная при  $k_3=1$ ; 3 – расчетная при  $k_3$  по (6). Если учесть, что максимальное значение индукции в стенке экрана  $B_{\max} \leq 1$  будет при  $\Delta/D \geq 0,02$ , то, как следует из рис. 4, можно считать, что расчетные и опытные значения эффективности экранирования при ненасыщенной магнитной системе экрана ( $B_{\max} \leq 1$ ) совпадают с достаточной для практики точностью (погрешность не более 20%).

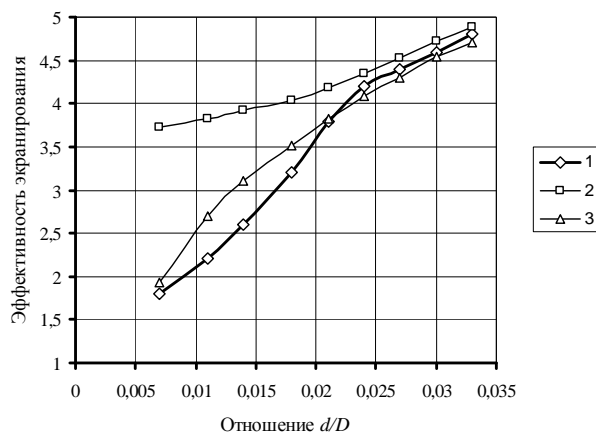


Рис. 4

наблюдения по продольной оси цилиндра из центра до плоскости торца, где осуществляется сварка элементов шинпровода, эффективность экранирования уменьшается примерно на 20 – 25 %.

**Выводы.** 1. Предложен метод расчета незамкнутых магнитоэкранных экранов, основанный на зависимости их экранирующих свойств от индуктивного магнитного момента, и предложена инженерная методика расчета экранов для локального объема вблизи поверхности нагруженных шинпроводов постоянного тока. Экспериментально подтверждены расчетные значения экранирующих свойств таких экранов.

2. Реальная эффективность цилиндрических открытых с торцов магнитоэкранных экранов находится на уровне 3÷5 при необходимом уровне демагнетизации в 5÷50 раз. Это ограничивает область возможного использования таких экранов в качестве основного средства защиты технологических процессов сварки шинпроводов электролизеров от негативного влияния магнитного поля на сварочную дугу и должно стимулировать разработку более эффективных комбинированных средств локальной демагнетизации, в том числе с экранами.

С увеличением насыщения экрана ( $\Delta/D < 0,02$ ) удовлетворительное соответствие расчетных и опытных значений эффективности экранирования дает расчет, учитывающий изменение коэффициента заполнения  $k_3$  по (6). Значения магнитной проницаемости  $\mu$  в (6) рассчитаны по основной кривой намагничивания (ОКН) стали 3411, которая получена экспериментально на образце №9 баллистическим методом с использованием микроверметра Ф-190.

По данным табл. 2 на рис. 5 показано относительное изменение эффективности экранирования при смещении точки наблюдения из центра экрана по продольной оси  $Z$  (1 – опыт; 2 – расчет).

Как следует из рисунка, при смещении точки

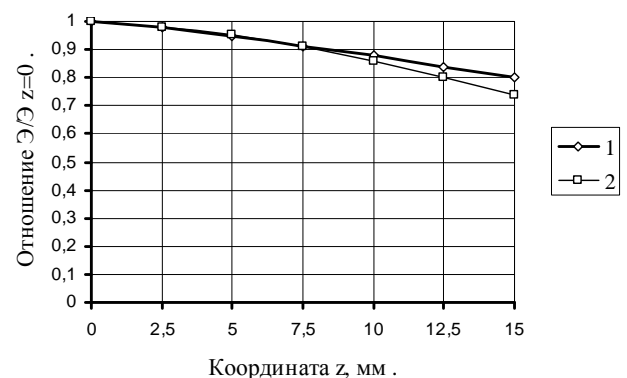


Рис. 5

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.  
Bessonov L.A. Theoretical Foundations of electrotechnics. Electromagnetic field. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1986. – 264 p. (Rus.)

2. Волохов С.А., Розов В.Ю., Мыслович М.В., Косошин С.С. Электромагнитное экранирование ферромагнитным корпусом электрической машины // Техн. электродинамика. – 2004. – №6. – С. 18–22.

Volokhov S.A., Rosov V.Yu., Myslovich M.V., Kokoshin S.S. Electromagnetic shielding with ferromagnetic shell of electrical machine // Tekhnichna elektrodynamika. – 2004. – №6. – P. 18–22. (Rus.)

3. Волохов С.А., Добродеев П.Н. Экранирующие свойства проводящих цилиндров конечной длины с ферромагнитными поясами // Электротехника. – 2006. – №8. – С. 22–26.

*Volokhov S.A., Dobrodeev P.N.* Shielding abilities of conducting cylinders of final length with ferromagnetic belts // *Elektrotehnika*. – 2006. – №8. – P. 22–26. (Rus.)

4. *Волохов С.А., Добродеев П.Н., Деркач В.В.* Локальная демагнетизация шинопроводов электролизёров // *Техн. электродинамика. Тем. выпуск "Проблемы сучасної електротехніки"*. – Ч. 2. – 2008. – С. 129–132.

*Volokhov S.A., Dobrodeev P.N., Derkach V.V.* Local demagnetization of busbars of electrolysis cells // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vupusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – Vol. 2. – 2008. – P. 129–132. (Rus.)

5. *Краснов И.П.* Расчетные методы судового магнетизма и электротехники. – Л.: Судостроение, 1986. – 216 с.  
*Krasnov I.P.* Calculation methods for ship magnetism and electrical engineering. – Leningrad: Sudostroenie, 1986. – 216 p. (Rus.)

6. *Лебедев В.А.* Задачи сварки в магнитных полях // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2004. – № 2. – С. 22–25.  
*Lebedev V.A.* Welding tasks in magnetic fields // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2004. – № 2. – P. 22–25. (Rus.)

7. *Лебедев В.А.* Обеспечение сварки в магнитных полях // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2004. – № 3. – С. 105–107.

*Lebedev V.A.* Welding ensuring in magnetic fields // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2004. – № 3. – P. 105–107. (Rus.)

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

*Rosov V.Yu., Piliugina O.Yu., Lupikov V.S., Dobrodeev P.N., Getman A.V., Volokhov S.A.* Introduction to demagnetization of technical objects // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2006. – № 4. – P. 55–59. (Rus.)

9. *Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В.* Магнитные измерения. – М.: Изд-во Комитета стандартов, 1969. – 248 с.

*Chernyshev E.T., Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studentsov N.V.* Magnetic Measurements. – Moskva: Izdatelstvo Komiteta Standartov, 1969. – 248 p. (Rus.)

10. *Шапиро Д.Н.* Основы теории электромагнитного экранирования. – Л.: Энергия, 1975. – 108 с.

*Shapiro D.N.* Fundamental theory of electromagnetic shielding. – Leningrad: Energiia, 1975. – 108 p. (Rus.)

11. *Способ ремонта* сваркой анодных стоек алюминиевых электролизеров: Пат. РФ № 2122486, МКИ В23Р6/04. / Рязузов В.Н., Воронков А.В., Волков А.И., Гордиенко В.И. – №2122486. Заявл. 10.07.1996. Опубликовано 27.11.1998.

*Method of repair* of anode posts of aluminium electrolyzers by welding: Pat. RF №2122486, МКИ В23Р6/04. / Riaguzov V.N., Voronkov A.V., Volkov A.I., Gordienko V.I. – №2122486; Patent 10.07.1996. Published 27.11.1998. (Rus.)

**С.А.Волохов<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.В.Деркач<sup>2</sup>, П.Н.Добродеев<sup>3</sup>, канд.техн.наук<sup>1,2,3</sup>** – Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України, вул. Індустріальна, 19, а/с 72, Харків-106, 61106, Україна.

#### **Магнітостатичне екранування зони зварювання поблизу шинопроводу**

*Аналітично та експериментально досліджено незамкнені магнітостатичні екрани, призначені для захисту технологічного процесу зварювання навантажених шинопроводів алюмінієвих електролізерів від шкідливої дії їхнього магнітного поля. Запропоновано інженерну методіку розрахунку таких екранів, яка підтверджена результатами експериментальних досліджень. Низька ефективність незамкнених екранів обмежує область їхнього можливого використання і стимулює розробку високоефективних засобів локальної демагнетизації. Бібл. 11, табл. 2, рис. 5.*

**Ключові слова:** магнітостатичні екрани, зварювання, демагнетизація.

**S.A.Volokhov<sup>1</sup>, V.V.Derkach<sup>2</sup>, P.N.Dobrodeev<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> – Scientific and Technical Center of Magnetism of Technical Objects of NAS of Ukraine, Industrialna str., 19, Kharkiv, 61106, Ukraine.

#### **Magnetostatic shielding of weld zone near busbar**

*Unlocked magnetostatic shields meant for protection of technological welding process of external busbars of aluminum electrolysis from detrimental effect of their magnetic field have been examined both analytically and experimentally. Engineering methodology of such shields' calculation confirmed with experimental results has been proposed. Low efficiency of unlocked shields restricts the field of their potential use and stimulates the development of high-performance means of local demagnetization. References 11, tables 2, figures 5.*

**Key words:** magnetostatic shield, welding, demagnetization.

Надійшла 30.06.2009

Received 30.06.2009