

УДК 621.317

**ЭКРАНИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫМИ ЭКРАНАМИ НА ОСНОВЕ  
АМОРФНЫХ ЛЕНТ FESOPV СЧЕТНЫХ МЕХАНИЗМОВ  
ИНДУКЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****Тихомиров Александр Андреевич**Кандидат физико-математических наук, доцент,  
Петрозаводский государственный университет  
Petrozavodsk state university  
Кафедра электроники и электроэнергетики  
tihomirov@petsu.ru**Черепанов Дмитрий Александрович**Петрозаводский государственный университет  
Кафедра электроники и электроэнергетики  
chda@gmail.com**Аннотация**

Точность работы приборов учета электроэнергии зависит от величины внешнего магнитного поля. В сильных магнитных полях материал экрана претерпевает магнитное насыщение, что приводит к снижению эффективности магнитного экранирования. В работе рассмотрена возможность экранирования счетного механизма прибора учета электрической энергии от воздействия внешнего постоянного магнитного поля с помощью аморфных лент на основе кобальта. Получены зависимости изменения коэффициента эффективности магнитного экранирования в зависимости от количества слоев и величины индукции магнитного поля. Результаты проведенных исследований показывают возможность применения аморфных лент на основе кобальта в качестве материала для экранов магнитного поля.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, аморфные ленты, магнитное поле**SHIELDING WITH MULTILAYER SCREENS BASED ON AMORPHOUS  
TAPES OF COUNTING MECHANISMS OF INDUCTION ELECTRICITY  
METERS****Aleksandr A. Tikhomirov**Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent  
Petrozavodsk state university  
Department of electronics and power engineering  
tikhomirov@petsu.ru

**Dmitriy A. Cherepanov**

Petrozavodsk state university

Department of electronics and power engineering

chda@gmail.com

---

## ABSTRACT

---

The accuracy of electricity metering devices depends on the magnitude of the external magnetic field. In strong magnetic fields, the screen material undergoes magnetic saturation, which leads to a decrease in the efficiency of magnetic shielding. The paper considers the possibility of shielding the counting mechanisms of an electric energy metering device from the effects of an external permanent magnetic field using amorphous cobalt-based tapes. The dependences of the change in the efficiency coefficient of magnetic shielding depending on the number of layers and the magnitude of the magnetic field induction have been obtained. The study findings show the possibility of using amorphous cobalt-based tapes as a material for magnetic field screens.

---

**Keywords:** power engineering, amorphous tapes, magnetic field

---

Электромагнитная обстановка окружающая приборы учета электроэнергии может существенно влиять на точность их работы. Снижение класса точности приборов учета, в том числе из-за изменения коэффициентов трансформации трансформатора тока под воздействием внешнего магнитного поля может является причиной существенных коммерческих потерь. Так постоянное магнитное поле, созданное например магнитом расположенным рядом с прибором учета электроэнергии, индуцирует тормозящий электромагнитный момент, замедляющий или останавливающий работу счетного механизма [1]. Переход на электронные приборы учета электроэнергии не снимает проблему защиты измерительных трансформаторов от внешнего магнитного поля, а также требования по помехозащищенности.

Существуют эффективные методы предотвращения воздействия внешнего магнитного поля на измерительные устройства приборов учета электроэнергии. Например, в [2] описывается возможность применения герконовых реле, а также датчиков Холла для отключения работы прибора учета при превышении порогового уровня внешнего магнитного поля. Отдельным методом защиты приборов учета является максимальное их удаление от потенциальных источников магнитного поля. Так магнитное поле постоянного магнита падает как  $1/r^3$ , то есть обратно пропорционально кубу расстояния. Это значит, что само по себе удаление прибора учета от источника магнитного поля, например вынос его на опоры ЛЭП, является хорошим методом защиты. Однако в ряде случаев, например в условиях, когда прибор учета находится в здании, где уже существует внутренняя система электроснабжения и перерыв электроснабжения недопустим, возникает задача создания электромагнитных экранов способных снижать сильное внешнее поле до уровня допустимой электромагнитной совместимости.

Методы снижения магнитного поля с помощью методов экранирования и их эффективность обсуждались в работах [3-5]. Можно выделить пассивное и активное экранирование магнитного поля как основные разновидности по принципу действия

магнитных экранов. Идея активного экранирования заключается в том, что магнитное поле является векторной величиной и исходя из этого можно создать внутреннее магнитное поле равное по величине и противоположно направленное внешнему магнитному полю так чтобы эти поля взаимно компенсировались. Однако реализация активного магнитного экранирования более сложна по сравнению с применением вокруг защищаемого объекта оболочек из материалов с высокой магнитной проницаемостью или так называемого пассивного экранирования. При превышении пороговой величины внешнего поля относительная магнитная проницаемость материала экрана перестает быть постоянной величиной и эффективность экранирования снижается. Вместе с тем, толщина магнитного экрана при пассивном экранировании также влияет на эффективность снижения магнитного поля. Проблема насыщения стенок экрана рассмотрена в [6-7], где показано, что эффективность магнитного экранирования в случае отсутствия насыщения пропорциональна относительной магнитной проницаемости и толщине экрана. При наличии насыщения материала магнитного экрана эффективность экранирования резко снижается и может быть повышена за счет увеличения толщины стенок. Известны методы применения многослойных экранов, которые позволяют увеличить эффективность магнитного экранирования при сильном внешнем магнитном поле [8].

Ферромагнитные металлические стекла находят применения в качестве магнитных экранов сложной формы [9]. Металлические ленты на основе Fe80-xCoхP14B6 являются магнитомягким материалом, с достаточно большой величиной насыщения, которая составляет около 1,4 Тл [10].

В данной работе рассмотрены экранирующие свойства многослойных экранов цилиндрической и квадратной формы изготовленных из аморфной ленты на основе кобальта от величины внешнего магнитного поля.

Свойства аморфной ленты АМАГ 186С, которая использовалась для намотки многослойных экранов, приведены в таблице 1. Толщина ленты составляет 20-22 мкм.

В работе рассмотрена цилиндрическая и прямоугольная геометрия экранов магнитного поля, для этого на каркасы из пластика толщиной порядка 1 мм соответствующей формы наматывались ленты для изучения экранирующей эффективности от величины магнитного поля и количество намотанных слоев.

На рис. 1 представлены размеры каркаса цилиндрической геометрии, на который наматывался экран.

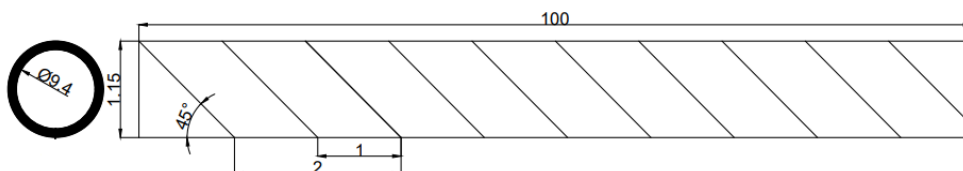


Рис. 1 – Размеры цилиндрического каркаса, на который наматывался экран

На рис. 2 представлены размеры каркаса квадратной геометрии, на который наматывался экран.

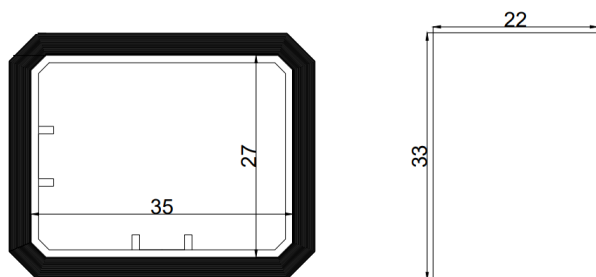


Рис. 2 – Размеры квадратного каркаса, на который наматывался экран  
Схема экспериментальных исследований приведена на рисунке 3.

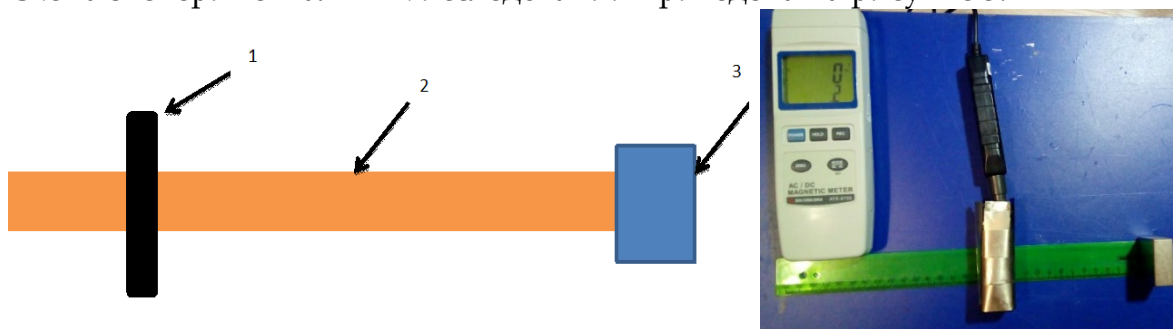


Рис. 3 – Схема экспериментальных исследований эффективности экранирования магнитного поля за счет применения многослойных экранов, где: 1 – постоянный неодимовый магнит, 2 – измерительная линейка, 3 – проверяемый антимагнитный экран с помещенным внутрь экрана датчиком магнетометра.

Неодимовый магнит габаритными размерами 4x4x2 см, приближался по измерительной линейке к магнитному датчику магнетометра с помощью которого регистрировалась величина индукции магнитного поля. В работе использовался магнетометр АТЕ-8702. Такая схема эксперимента позволяет изменять магнитное поле с помощью постоянного магнита в выбранной точке пространства.

В результате проведенных измерений были получены зависимости изменения внешнего магнитного поля при разном количестве слоев экрана. На рис. 4 представлены зависимости изменения магнитного поля от расстояния при использовании экрана цилиндрической формы.

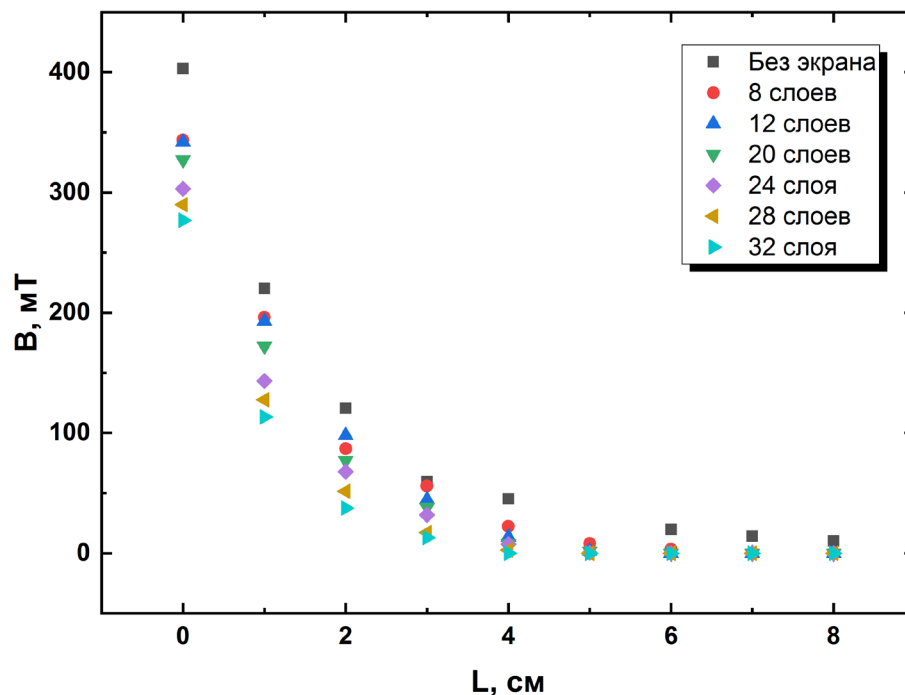


Рис. 4 – Зависимость изменения магнитного поля от расстояния при использовании экрана квадратной формы

На рис. 5 представлены зависимости изменения внешнего магнитного поля от расстояния до экрана квадратной формы.

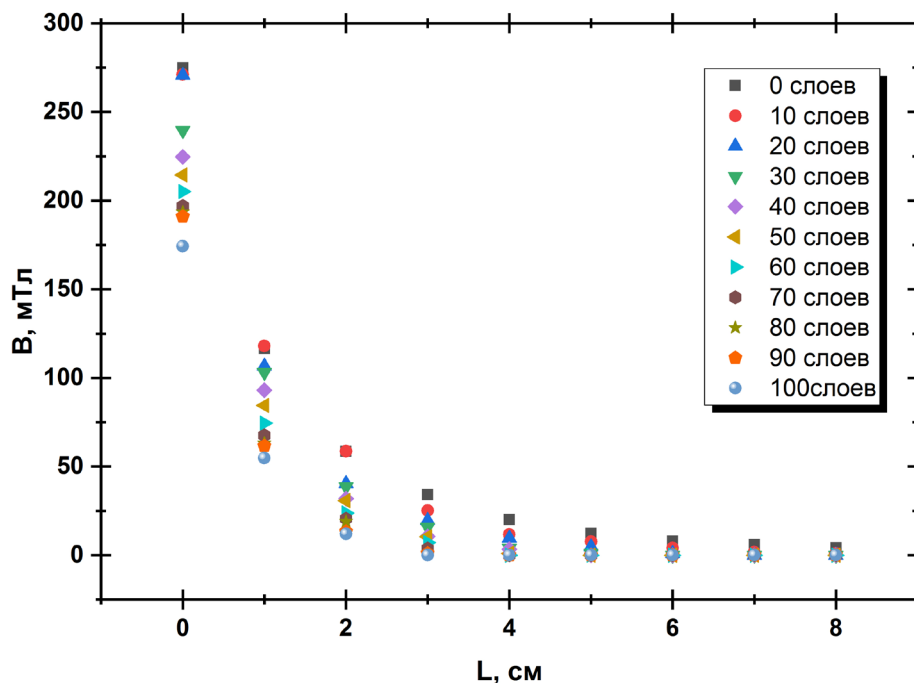


Рис. 5 – Зависимость изменения магнитного поля от расстояния при использовании экрана квадратной формы

Представленные измерения на рис. 2 и 3 проводились для различного количества слоев аморфной ленты, что позволяет оценить эффективность магнитного экранирования от толщины магнитного экрана и величины внешнего магнитного поля. На основании

полученных данных были проведены расчеты коэффициента эффективности экранирования согласно выражению [11]:

$$SE = 20 * \log_{10} \frac{B_0}{B_i} \quad (1)$$

Значения коэффициентов эффективности экранирования для экрана цилиндрической формы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов экранирования для экрана цилиндрической формы

Индукция магнитного поля, мТл	Коэффициент эффективности экранирования, SE					
	Экран 8 слоев	Экран 12 слоев	Экран 20 слоев	Экран 24 слоя	Экран 28 слоев	Экран 32 слоя
403	1,38	1,4	1,8	2,47	2,86	3,25
220	1	1,15	2,13	3,73	4,75	5,7
120	1,5	1,81	3,9	5,02	7,41	10,1
59,5	2,94	2,5	3,8	5,4	10,83	13,35
45,2	6,18	10,57	15	9	--	--
22,0	10	--	--	--	--	--
19,8	15	--	--	--	--	--

Значения коэффициентов эффективности экранирования для экрана квадратной формы приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов экранирования для экрана квадратной формы

Индукция магнитного поля, мТл	Коэффициент эффективности экранирования, SE									
	Количество слоев в экране									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
275	0,12	0,13	1,19	1,76	2,15	2,54	2,90	3,05	3,16	3,96
271	0,10	0,78	1,07	1,96	2,80	3,90	4,74	5,34	5,54	6,57
256	0,00	3,21	3,63	5,28	5,59	7,83	9,08	9,78	12,82	13,77
239	2,68	4,86	6,73	10,12	10,37	13,56	19,11	29,12	30,71	--
224	4,63	6,42	14,02	15,43	26,06	--	--	--	--	--
214	3,96	8,17	21,80	--	--	--	--	--	--	--
205	6,02	18,06	--	--	--	--	--	--	--	--

Проведенные исследования показывают нелинейную зависимость эффективности экранирования, как от величины магнитного поля, так и от толщины материала из которого изготовлен экран. Однако увеличение толщины экрана позволяет существенно уменьшить воздействие внешнего поля. Применение аморфных лент может использоваться для защиты

приборов учета электроэнергии от воздействия внешнего магнитного поля с учетом технических требований к электромагнитной совместимости.

#### Список литературы:

1. Сапронов А. А. Способы хищения электроэнергии и их роль в структуре коммерческих потерь // Энергоснабжение 2006 – №4 (42). – С. 50-54
2. Diahovchenko I. M. Electromagnetic compatibility and protection of electric energy meters from strong magnetic fields Electric / I. M. Diahovchenko, R. G. Olsen // Power Systems Research Volume 2020. – V. 186, – P. 106400
3. Schulz R.B. Shielding Theory and Practice / R.B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush // Shielding, IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1988 – V. 30 (3). – P. 187-201
4. Chien T.T. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility / T.T. Chien, B.T.M. Tu, T.N. Do // International Conference on Electronics, Information, and Communications, ICEIC 2016. – P. 1-4
5. Li P. An efficient approach for analyzing shielding effectiveness of enclosure with connected accessory based on equivalent dipole modeling / P. Li, F.R. Yang, W.Y. Xu // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2016 – V. 58 (1). – P. 103-110
6. Аполлонский С. М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. – Л. : Энергоатомиздат, 1988
7. Меренков Д. В. Пассивное экранирование в сильных постоянных магнитных полях / Д. В. Меренков, Г. С. Тамоян, А. С. Устьянцева // Электричество 2008 – №3. – С. 67-69
8. Дмитренко В. В. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей / В. В. Дмитренко, П. В. Ньюнт, К. Ф. Власик, В. М. Грачев и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН 2015 – Т. 42. – № 5 –С. 43-48
9. Serban V. Fe-based Bulk Metallic Glasses Used for Magnetic Shielding / V. Serban, C. Codrean, U. Dragos, E. Aurel // Journal of Physics Conference Series January 2009. –V. 144(1) – P. 012037
10. Severikov V. S. Study of inverse magnetostrictive effect in metallic glasses Fe<sub>80-x</sub>CoxP<sub>14</sub>B<sub>6</sub> / V. S. Severikov, A. Grishin, V. S. Ignahin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2017 – V. 929 –P. 012049
11. Xuyou Lia Design of high shielding effectiveness magnetic shield for fiber optic gyroscope / L. Xuyou , L. Haoyu, G. Yuanxin, L. Pan,Z. Yue, G. Yanda, M. Qingwen // Optik 2019– V. 198 – P. 163160

#### References:

1. A. A. Sapronov Methods of electricity theft and their role in the structure of commercial losses // Energy supply 2006 – №4 (42). – P. 50-54
2. Diahovchenko I. M. Electromagnetic compatibility and protection of electric energy meters from strong magnetic fields Electric / I. M. Diahovchenko, R. G. Olsen // Power Systems Research Volume 2020. – V. 186, – P. 106400

3. Schulz R.B. Shielding Theory and Practice / R.B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush // Shielding, IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1988 – V. 30 (3). – P. 187–201
4. Chien T.T. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility / T.T. Chien, B.T.M. Tu, T.N. Do // International Conference on Electronics, Information, and Communications, ICEIC 2016. – P. 1–4
5. Li P. An efficient approach for analyzing shielding effectiveness of enclosure with connected accessory based on equivalent dipole modeling / P. Li, F.R. Yang, W.Y. Xu // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2016 – V. 58 (1). – P. 103–110
6. Appolonskyi S. M. Handbook for the calculation of electromagnetic screens – L. : Energoatomizdat, 1988
7. Merenkov D. V. Passive shielding in strong permanent magnetic fields / D. V. Merenkov, G. S. Tamonan, A. S. Ustanseva // Electricity 2008 – №3. – P. 67–69
8. Dmitrenko V. V. Prospects for the use of multilayer film screens to protect space equipment from permanent magnetic fields / V. V. Dmitrenko, P. V. Nynt, K. F. Vlasik and et all // Brief reports on physics FIAN 2015 – T. 42. – № 5 –P. 43–48
9. Serban V. Fe-based Bulk Metallic Glasses Used for Magnetic Shielding / V. Serban, C. Codrean, U. Dragos, E. Aurel // Journal of Physics Conference Series January 2009. –V. 144(1) – P. 012037
10. Severikov V. S. Study of inverse magnetostrictive effect in metallic glasses Fe<sub>80-x</sub>CoxP<sub>14</sub>B<sub>6</sub> / V. S. Severikov, A. Grishin, V. S. Ignahin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2017 – V. 929 –P. 012049
11. Xuyou Lia Design of high shielding effectiveness magnetic shield for fiber optic gyroscope / L. Xuyou , L. Haoyu, G. Yuanxin, L. Pan,Z. Yue, G. Yanda, M. Qingwen // Optik 2019– V. 198 – P. 163160