

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ КОНТРОЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ: ЕСТЬ ЛИ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ?

В.И. ГУРЕВИЧ (Центральная лаборатория Электрической компании Израиля)

Не утихают споры относительно количества точек заземления экранов контрольных кабелей. Этими спорами заполнены многочисленные форумы специалистов, причем, на разных языках, страницы профессиональных журналов. Почему? Наверное, потому, что практический опыт эксплуатации оборудования намного богаче чисто теоретических рассуждений и на практике встречаются случаи, когда лучшие результаты получаются при одностороннем заземлении экранов, но встречаются и случаи, когда лучше работает двустороннее заземление экранов. О причинах этих противоречий и об одном новом методе заземления экранов рассказывается в данной статье.

Ключевые слова: кондуктивные помехи, емкостные помехи, индуктивные помехи, электростатические помехи, микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ), ЭМИ ЯВ.

Экранирование является общепризнанной мерой повышения помехоустойчивости аппаратуры. В общем виде электромагнитный экран представляет собой металлическую перегородку (барьер) между источником электромагнитного излучения и защищаемой зоной, рис. 1.

Как можно видеть из этого рисунка, часть 3 энергии 2, падающей на экран отражается обратно в пространство от наружной поверхности, другая часть 4 проникает во внутрь металла и отражается от пограничного слоя,

образованного стенкой экрана и внешней средой, еще одна часть энергии 5 преобразуется в электрические токи внутри металла, а оставшаяся после всех этих превращений часть энергии 6 все-таки проникает в защищаемую зону в виде помехи.

Заземление экранов контрольных кабелей считается эффективной мерой ослабления этих помех. Существуют две основные концепции заземления экранов контрольных кабелей: с одной стороны кабеля и с двух сторон кабеля, рис. 2.

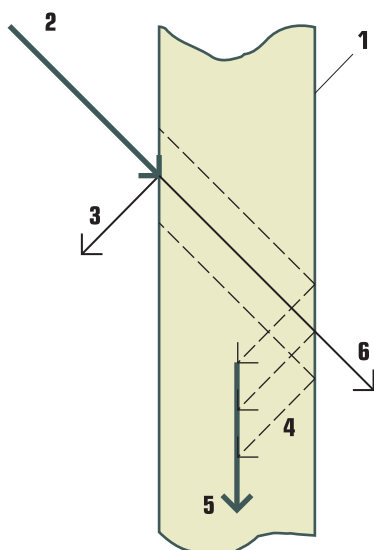


Рис. 1.

Принцип действия металлического экрана

1 – металлическая перегородка (экран); **2** – энергия электромагнитной волны, падающая на экран; **3** – часть энергии, отраженной от поверхности экрана; **4** – часть энергии, отраженная от пограничного слоя, образованного стенкой экрана и внешней средой; **5** – часть энергии, преобразованной в ток в металле; **6** – остаточная часть энергии, проникающая через экран в защищаемую зону

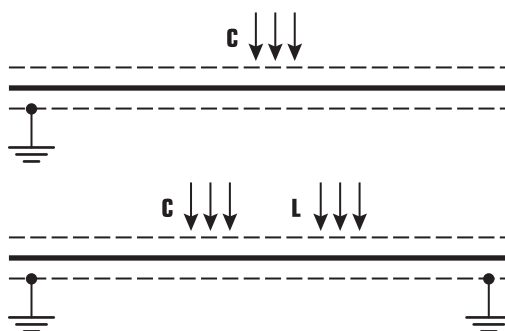


Рис. 2.

Общепринятые варианты заземления экранов контрольных кабелей: с одной стороны кабеля, защищающий от емкостных наводок (**C**) и с двух сторон, защищающий от емкостных (**C**) и индуктивных (**L**) наводок

Очевидно, что эти два варианта обладают различными особенностями и характеристиками по отношению к различным видам помех. Различают четыре основных типа помех:

- кондуктивные;
- емкостные;
- индуктивные;
- электростатические.

Каждый из этих типов помех подразделяются на два вида:

- помехи типа “провод-земля”, напряжение которых приложено между каждым из проводников и землей, которые еще называются несимметричными, синфазными, общего вида;
- помехи типа “провод-провод”, напряжение которых приложено между отдельными электрическими цепями, или между элементами одной и той же электрической цепи, которые еще называются симметричными, противофазными, дифференциальными.

Кондуктивные помехи распространяются при наличии непосредственного электрического контакта между электрическими цепями и поэтому экранирование контрольных кабелей никак не связано с этим видом помех в этих электрических цепях.

Емкостные помехи распространяются через емкости между центральными жилами кабеля и землей, между экраном и землей, между экраном и центральными жилами. Заземление экрана кабеля в одной или двух точках шунтирует емкость между экраном и землей, но также приближает “землю” к центральной жиле, увеличивая емкость между ней и землей, что лишь облегчает проникновение емкостной помехи из земли на центральные жилы. Однако, кроме помех, распространяемых по цепям земли, имеются помехи от соседних кабелей, от проводов высокого напряжения, от мощных высоковольтных коммутационных аппаратов и других источников электромагнитных помех. Если эти помехи являются синфазными, то есть создающими потенциал относительно земли, то заземление экрана кабеля в одной точке позволяет полностью избавиться от такой помехи. Например, если в общем кабельном лотке проложен неэкранированный кабель, на жилах которого периодически возникают значительные импульсные напряжения относительно земли, то заземление экрана рядом расположенного контрольного кабеля в одной точке, позволяет эффективно защитить центральные жилы контрольного

кабеля от импульсных помех со стороны неэкранированного кабеля. Но если упомянутые импульсные напряжения в неэкранированном кабеле вызывают протекание по нему импульсных токов (наиболее распространенный случай), создающих вокруг него импульсное магнитное поле (индуктивная помеха дифференциального типа), то совершенно очевидно, что заземление в одной точке экрана контрольного кабеля, расположенного рядом, не даст никакого эффекта и в центральных жилах контрольного кабеля будет наведена помеха. Заземление экрана в двух точках по концам кабеля позволяет создать замкнутый контур для наведенного в экране тока через систему заземления и таким образом существенно ослабить влияние индуктивной помехи на центральные жилы контрольного кабеля.

Статические помехи, возникающие в результате накопления статического заряда на хорошо изолированных от земли частях аппаратуры с последующим пробоем на землю, не представляют угрозы для кабелей, поскольку через реально существующие сопротивления изоляции на землю такой заряд свободно стекает на землю и не накапливается.

Из рассмотренных выше примеров видно, что заземление экранов контрольных кабелей в одной точке позволяет защитить центральные жилы лишь от емкостных помех синфазного (относительно земли) типа, тогда как заземление на концах кабеля позволяет защитить центральные жилы от всех типов помех. По-видимому, исходя из приведенных выше соображений, в большинстве случаев рекомендуется использовать именно такой метод заземления экранов контрольных кабелей.

Но, если бы все было так просто! На самом деле, система заземления вовсе не идеальна. Если кабель достаточно длинный, а протекающий через систему заземления ток значительный, то между точками заземления экрана, расположенными на большом расстоянии друг от друга, возникает высокая разность потенциалов. По данным [1] эта разность потенциалов в реальных системах заземления при ударах молнии может достигать 10 кВ и более. И это еще не самое страшное. При воздействии на всю систему заземления (как на огромную антенну) распределенного на большой площади электрического поля электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) с напряженностью поля у поверхности земли, достигающей до 50 кВ/м, разность потенциалов в точках присоединения экранов длинных ка-

белей может достигать многих десятков киловольт. Это напряжение, приложенное напрямую (то есть контактным способом) к экрану вызовет протекание через него импульса тока большой амплитуды, индуцирующего значительный ток в центральных жилах кабеля, подключенных непосредственно к электронным элементам оборудования.

Так какой же, в таком случае, вариант заземления экранов контрольных кабелей предпочтительнее?

Большинство официальных документов, таких как стандарты, руководящие указания, инструкции как гражданского, так и военного назначения [2-8] однозначно устанавливают способ заземления экранов с двух сторон кабеля. Несмотря на известность всех этих документов, среди специалистов во всех странах мира, занимающихся практической эксплуатацией электронного оборудования энергосистем (в частности, микропроцессорных устройств релейной защиты – МУРЗ), не утихают споры относительно количества точек заземления экранов контрольных кабелей. Этими спорами заполнены многочисленные форумы специалистов, причем, на разных языках, страницы профессиональных журналов. Почему? Наверное, потому, что практический опыт эксплуатации оборудования намного богаче чисто теоретических рассуждений и на практике встречаются случаи, когда лучшие результаты получаются при одностороннем заземлении экранов, но встречаются и случаи, когда лучше работает двустороннее заземление экранов. В чем тут дело?

Личные контакты автора с ведущими в мире специалистами в этой области, авторами фундаментальных монографий [9-11] не смогли в достаточной мере прояснить ситуацию. Поэтому автор попытался самостоятельно проанализировать ситуацию и найти ответ на поставленный в заголовке вопрос.

Результатом подробного анализа многих десятков публикаций по этой теме, включая фундаментальные труды, в которых вопросы заземления экранов кабелей рассмотрены очень подробно и всесторонне (например, в [11] это отдельная глава 7 объемом 119 страниц), стал неутешительный вывод о том, что единого универсального ответа на поставленный в заголовке статьи вопрос нет и быть не может в принципе. Более того, не представляется возможным даже сформулировать какие-то четкие общие рекомендации по выбору того или иного способа заземления экранов, до-

ступные и пригодные для практического применения персоналом энергосистем.

Такая ситуация сложилась по той причине, что имеющиеся наставления, рекомендации, статьи, и даже стандарты, рекомендуемые какой-то определенный тип заземления экранов контрольных кабелей, обосновывают выбор лишь на основе очень ограниченного количества факторов из обширной их совокупности, реально влияющих на помехоустойчивость электронной аппаратуры, условно принимая одни из них и пренебрегая другими. Отсюда и непрекращающиеся споры в среде энергетиков о предпочтениях того или иного способа заземления экранов и ссылки на личный опыт, часто противоположный опыту других участников обсуждения. О каких факторах идет речь?

1. Чувствительность различных видов электронной аппаратуры к помехам различных типов, частоты, длительности, амплитуды не одинакова, поэтому одна помеха может вызвать сбой в работе аппаратуры, а другая, даже намного более мощная, но имеющая другую частоту или длительность импульса, может не вызвать сбой той же аппаратуры. Из этого также следует, что одна и та же помеха, проникшая по различным жилам многожильного кабеля на входы различных электронных устройств, может вызвать сбой одних устройств и не затронуть другие.
2. Имеет место влияние импульсных токов, протекающих по экрану одного кабеля на токи, протекающие в центральной жиле этого кабеля, в экранах соседних кабелей, проложенных параллельно в общем кабельном лотке или влияние токов в центральных жилах неэкранированных кабелей на токи в экранах экранированных кабелей, если оба типа кабелей уложены в общем лотке.
3. Различные типы кабельных лотков: металлические или пластмассовые с металлическим напылением, открытые или закрытые – по-разному ослабляют электромагнитные помехи.
4. Имеет место существенная зависимость таких параметров экрана, как его индуктивное сопротивление протекающему через него току, а также емкостное сопротивление между центральными жилами и экраном, между центральными жилами и землей, между экраном и землей от частоты помехи или длительности и крутизны переднего фронта импульсной помехи.

5. Различные типы экранов: одно-, двух-, трех-, четырехслойные (рис. 3), только из витых проволок, только из фольги, комбинированные: из витых проволок и фольги — обладают различной экранирующей способностью на различных частотах, рис. 4.
6. Имеется также взаимосвязь между толщиной экрана и частотой помехи, поскольку в зависимости от этой частоты электромагнитная волна помехи может проникать в экран на различную глубину (так называемый скин-слой), соизмеримую с толщиной экрана (0,1-0,2 мм), табл. 1.
7. Экранирующая способность экрана зависит также от степени заполнения поверхности защищаемого провода экраном. Выпускаются экраны с заполнением от 60 % до 95 %. То есть, одна и та же помеха может совершенно по-разному влиять на аппаратуру в зависимости от конкретного типа применяемого кабеля.
8. Длина экранированного кабеля влияет на поглощающую способность экрана при воздействии на него волны электромагнитного поля, особенно соотношение длины этой волны и длины кабеля. То есть, помехи различной частоты (то есть электромагнитные волны различной длины) по-разному влияют на один и тот же кабель и наоборот, одна и та же помеха по-разному будет влиять на кабели различной длины.
9. Состояние, тип и параметры системы заземления очень сильно влияют на эффективность работы заземленных экранов кабелей. Выше уже было рассмотрено в качестве примера подключение экрана длинного кабеля, с двух сторон к реальной (а не теоретической) системе заземления.
10. Близость кабеля или даже отдельных его участков к источникам помех и его ориентация по отношению к этим источникам играет немаловажную роль в общей картине.

Из рассмотрения этого даже ограниченно перечня факторов, влияющих на эффективность работы экранов контрольных кабелей, становится понятным, что для однозначного выбора того или иного варианта заземления экрана просто-напросто не хватает данных. И даже отсутствие одного из этих данных, например, параметров импульсных помех, воздействующих на конкретный кабель, делает невозможным принятие однозначного решения. Становится очевидным также, что даже общая теоретическая расчетная модель (если

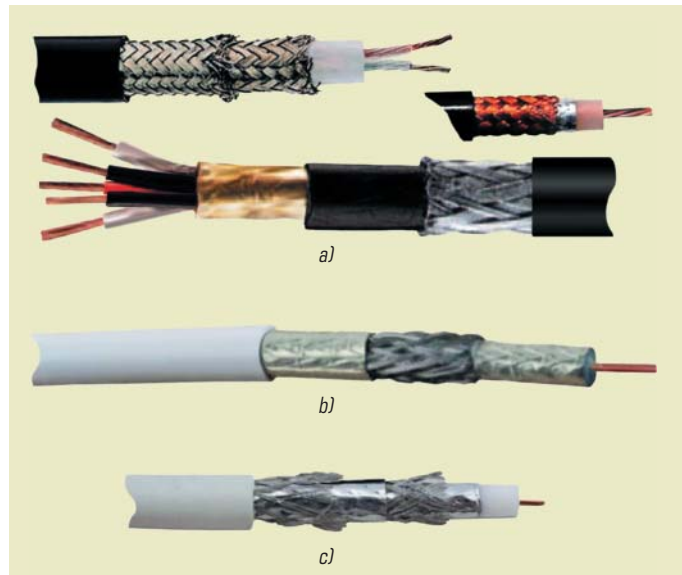


Рис. 3. Кабели с двойным (а), тройным (b) и четверным (с) комбинированным (оплетка-фольга) экранированием

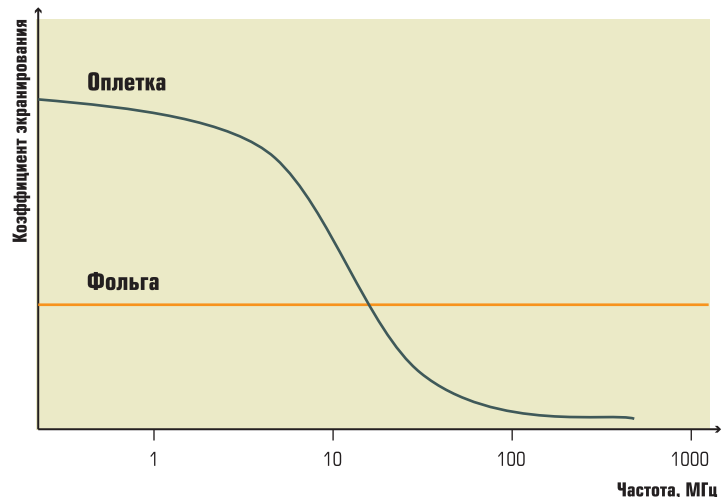


Рис. 4. Зависимость коэффициента экранирования от частоты для экранов в виде оплетки и фольги

Таблица 1. Глубина проникновения электромагнитной волны в медь

Частота, МГц	Глубина проникновения, мм
0,001	2,09
0,01	0,66
0,1	0,21
1,0	0,066
10	0,02
100	0,0066
1000	0,0021



▲ Рис. 5. Предлагаемый вариант заземления экранов контрольных кабелей

бы ее удалось построить) будет бесполезной на практике из-за отсутствия исходных данных для конкретных условий. Поэтому, по нашему мнению, вывод об эффективности того или иного метода заземления экранов контрольных кабелей может быть сделан лишь на основе опыта эксплуатации конкретных типов оборудования в конкретных условиях.

Рассмотрим еще один аспект этой темы, а именно вопрос о том, что считать “опасной” помехой для электронного оборудования энергосистем. Например, является ли опасной помеха в виде единичного импульса длительностью несколько миллисекунд (молния) или несколько наносекунд (ЭМИ ЯВ) для такого распространенного вида электронного оборудования энергосистем, как микропроцессорное устройство релейной защиты (МУРЗ) с типовым быстродействием 20-40 миллисекунд? Вряд ли, поскольку за столь короткое время действия помехи она не сможет кардинально повлиять на относительно длительный процесс обработки информации и выработки необходимой функции в МУРЗ. Но что, если эта “помеха” будет иметь амплитуду в десятку киловольт? Здесь уже речь идет не о сбое в программе обработки информации, а о безвозвратном повреждении внутренних электронных компонентов. Эти два вида наиболее

мощных, но коротких помех, как это было показано выше, проникают в контрольный кабель чисто контактным путем из системы заземления на экран (при его двухстороннем заземлении), а дальше уже индуктивным способом с экрана на внутренние жилы. Из этих рассуждений следует, что сами по себе короткие импульсные помехи длительностью, соответствующие разряду молнии или ЭМИ ЯВ не страшны для электронной аппаратуры (по крайней мере для МУРЗ), если их амплитуда будет оставаться низкой.

На основе этих рассуждений предлагается необычный метод заземления экрана контрольного кабеля, заключающийся в его заземлении с двух сторон, но с одной стороны через высокочастотный дроссель, рис. 5, обладающий определенным индуктивным сопротивлением.

На первый взгляд, это предложение противоречит всем канонам, утверждающим, что даже незначительное увеличение индуктивного сопротивления цепи заземления экрана снижает эффективность экранирования на высоких частотах. Но ведь с этим никто и не спорит: действительно, при включении в цепь заземления дросселя эффективность экранирования на высоких частотах (то есть при очень коротких импульсах) от индуктивных наводок (не представляющих серьезную опасность) будет ниже. Но зато наиболее опасная мощная помеха, проникающая на экран контактным путем из системы заземления будет существенно подавлена.

В качестве высокочастотного дросселя в этом варианте заземления могут быть использованы как устройства обычной конструкции, рис. 6, включаемые в рассечку провода, соединяющего экран с системой заземления, так и разборные ферритовые коль-

▶ Рис. 6. Высокочастотные дроссели традиционной конструкции

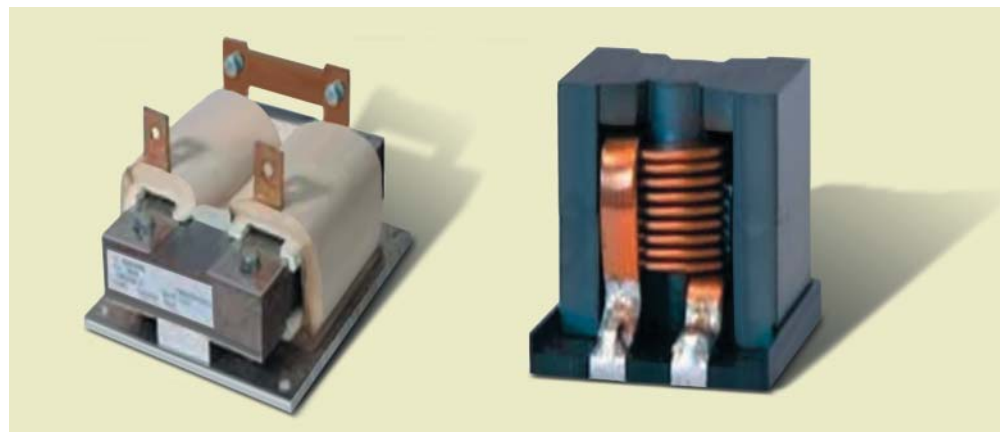




Рис. 7. Ферритовые кольца в пластмассовых держателях с защелкой

ца в пластмассовом держателе с защелкой, рис. 7, одеваемые на провод и не требующие его разрыва.

Несмотря на свою простоту и дешевизну, эти ферритовые кольца, а, по-существу, фильтры, обладают хорошей способностью ослаблять высокочастотный ток, рис. 8.

Однако, в случае использования ферритовых колец необходимо учитывать некоторые их специфические особенности, описанные в [12]. Для получения требуемой частотной характеристики можно на одном проводе закрепить несколько колец из ферритов различных марок.

По эффективности защиты от маломощных помех предложенный метод заземления экранов контрольных кабелей занимает промежуточное положение между двумя базовыми вариантами и поэтому в некоторых конкретных случаях он может работать лучше одного из традиционных способов заземления, а в некоторых — хуже. Однако во всех случаях использование заградительного высокочастотного дросселя позволит предотвратить проникновение в кабель наиболее мощных и опасных помех со стороны системы заземления, вызванных молнией и ЭМИ ЯВ.

При наличии в экране постоянной низкочастотной наводки (обычно, это довольно мощная помеха частотой 50 Гц), вызывающей усиленный нагрев экрана, можно использовать известный метод ограничения низкочастотного тока в экране путем включения конденсатора в заземляющий проводник экрана, рис. 9, в дополнение к предложенному выше дросселю.

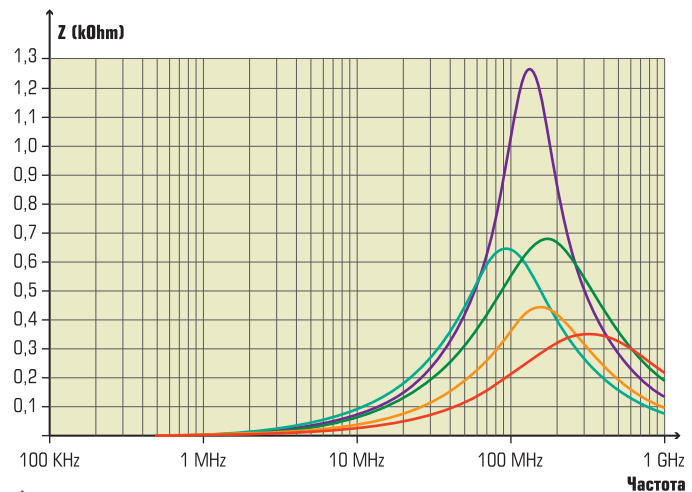


Рис. 8. Типовые зависимости полного сопротивления (Z) ферритового фильтра от частоты для некоторых марок ферритов

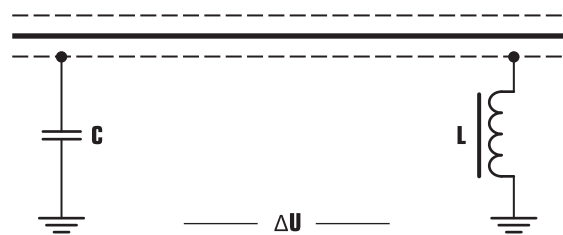


Рис. 9. Комбинированное заземление экрана контрольного кабеля с помощью емкости и индуктивности, образующих полосовой фильтр

Такой комбинированный полосовой фильтр, содержащий последовательно включенные емкость и индуктивность, будет эффективно подавлять в экране как низкочастотные индуктивные наводки, так и очень короткие мощные импульсные помехи кондуктивного типа со стороны системы заземления.

Список литературы

1. Кузнецов М.Б., Матвеев М.В. Защита от вторичных проявлений молнии и обеспечение ЭМС МП аппаратуры на объектах нефтегазовой отрасли. – Энергоэксперт, 2007, № 2, с. 61-65.
2. СТО 56947007-29.240.044-2010 “Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства”, Стандарт организации ОАО “ФСК ЕЭС”, 2010.
3. РД 34.20.116-93 “Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех”, РАО “ЕЭС России, 1993.
4. *IEEE Std. 1100-2005*. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, 2005, 589 p.
5. *TM 5-690* Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Headquarters Department of the Army, Washington, DC, 2002.
6. *MIL-HDBK-419A* Grounding, Bonding, and Shielding for Electronic Equipment and Facilities, U. S. Department of Defense, 1987, 404 p.
7. *MIL-HDBK-1857* Grounding, Bonding and Shielding Design Practice, U. S. Department of Defense, 1998, 176 p.
8. *Theory of Shielding and Grounding of Control Cables to Reduce Surges*. – General Electric Company, Power System Management Business Department, 1973.
9. *Tsaliovich A.* Electromagnetic Shielding Handbook for Wired and Wireless EMC Applications. – Springer, New York, 1999, 682 p.
10. *Tsaliovich A.* Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility. – Springer, New York, 1995, 469 p.
11. *Joffe E.B., Lock K.S.* Grounds for Grounding. A Circuit-to-System Handbook, Wiley, Chichester, UK, 2010, 1065 p.
12. *Гуревич В.И.* Ферритовые фильтры. – Компоненты и технологии, 2015, № 10, с. 16-18.

Гуревич Владимир Игоревич – канд. техн. наук, Почетный профессор Харьковского национального технического университета им. П. Василенко, начальник сектора Центральной лаборатории Электрической компании Израиля, эксперт комитета ТС94 Международной электротехнической комиссии.
<http://www.gurevich-publications.com> E-mail: vladimir.gurevich@gmx.net