

Литература: 1. Maier K. Mapping waveforms to systems: What would a wideband networking waveform system require? // *Military EMBEDDED SYSTEMS*. – October, 2005. P. 38-41. 2. Горлинский Б. В., Ливенцев С. П., Зайцев С. В. Обоснование направлений модернизации ведомственной системы радиосвязи с подвижными объектами за счёт применения современных технологий // *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні*. № 2(13). Київ – 2006, стр 27-32. 3. *Specialized Hardware Supplement to the Software Communication Architecture Specification // JTRS-5000 SP, V3.0*. – August 27, 2004. P.4-1 – 4-7. (<http://jtrs.spawar.navy.mil/>) 4. С. Зайцев, С. Ливенцев, Б. Горлинський, А. Артюх. “Имитационная модель системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, помехоустойчивым турбокодированием и функционирующая в условиях радиоэлектронного противодействия” // *Комп’ютерна програма. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 17007*. Державний департамент інтелектуальної власності. К. – 20.06.2006. 5. Васильев В. И., Хоанг Тху Ха Турбокод – основные характеристики, особенности применения и моделирования // *Вестник Воронежского государственного университета*. – 2004, № 2. С. 8-15. 6. Guillen A., Grant A. Capacity Approaching Codes for Non-Coherent Orthogonal Modulation // *Institute for Telecommunications Research, University of South Australia*. September 12, 2006. P. 1-28. 7. Varnica N., Xiao Ma, Kavcic A. Capacity of power constrained memoryless AWGN channels with fixed input constellations // *Global Telecommunications Conference, 2002. _GLOBECOM '02. IEEE. Nov. 2002. Volume 2. P. 1339-1343*. 8. McIlree P. Channel Capacity Calculations for M-ary N-dimensional Signal Sets // *Thesis for the degree of Master of Engineering in Electronic Engineering. The University of South Australia*. February, 1995. P. 7-24. 9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение // *Москва-Санкт-Петербург-Київ*. 2003. С. 138-145. 10. Борисов В.И., Зинчук В.М. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Издательство “Радио и связь”, 2000. С. 64-111.

УДК 621.372

АНАЛИЗ ЗАЩИТЫ КОМПЬЮТЕРА ОТ УТЕЧКИ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ И ЗАЗЕМЛЕНИЯ

*Василий Стеченко, Виктор Найдено, Михаил Прокофьев, Андрей Курашкевич**

*НИЦ “ТЕЗИС” НТУУ “КПИ”, *Государственная служба специальной связи и защиты информации*

Аннотация: Показано, что в зданиях с двухпроводной сетью электропитания заземление компьютера отдельно проложенным проводом создает незащищенный канал распространения и переизлучения электромагнитного поля, наведенного узлами компьютера на кабель электропитания. Рассмотрены возможные каналы утечки сигналов по трехжильному сетевому кабелю. Подключение компьютера к сети отдельным трехжильным кабелем и соединение защитного провода с нулевым проводом электросети позволяет зашумлять этот канал утечки помехой от других работающих в здании компьютеров.

Summary: It is shown, that in buildings with two wire power supply net, ground connection of computer by separately wired producing unprotected channel of propagation and reradiation electromagnetic field, interference by computer units to power supply cable. By connecting computer to power supply net by three-core cable and connecting protective conductor with neutral main, allows noising this leakage path by interference with computers in this building.

Ключевые слова: Сеть электропитания, заземление, каналы утечки сигналов.

I Введение

Обрабатываемая информация в компьютере циркулирует в виде импульсных электрических сигналов. Эти сигналы, как правило ослабленные, присутствуют на выходе блока питания и далее по проводам электросети могут распространяться на значительные расстояния. Будем называть такие сигналы опасными. Для подавления опасных сигналов в цепи электропитания применяют сетевые фильтры, трансформаторы с разделенными обмотками и заземляют корпус компьютера. Эффективность устройств и способов подавления зависит от диапазона частот, в котором существуют опасные сигналы, что часто не учитывается на практике. В статье рассматриваются возможные каналы утечки опасных сигналов по цепям питания и заземления, а также исследуется эффективность их подавления средствами защиты информации.

II Анализ прохождения опасных сигналов от компьютера через сетевой фильтр и разделительный трансформатор

С выхода сетевого блока питания компьютера опасный сигнал может попадать в сеть электропитания по трем проводам (рис. 1): двум сетевым проводам трехжильного сетевого кабеля (на рис. 1 это провода P1 и P2) и защитному проводу PE. Это первый канал утечки опасного сигнала.

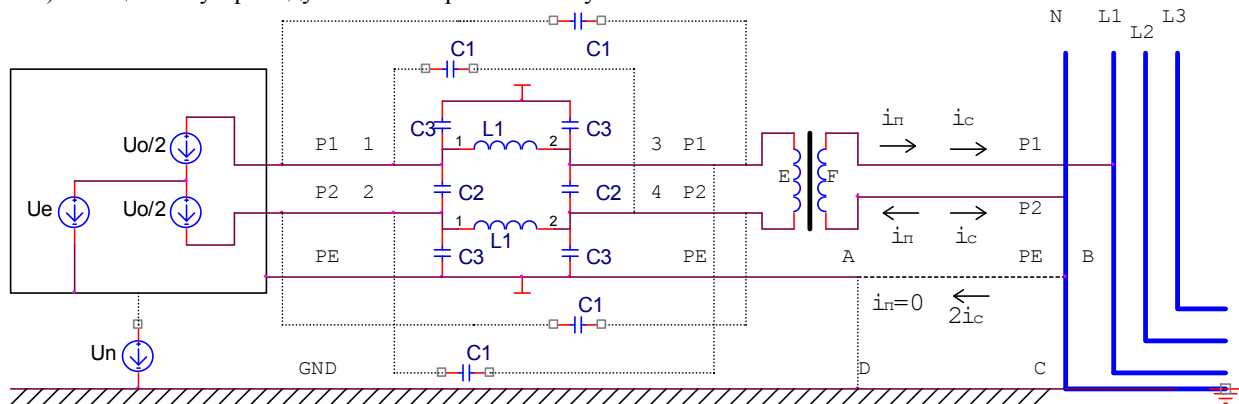


Рисунок 1 – Схема подключения компьютера к электросети; U_o – эквивалентный источник противофазных сигналов, U_e – эквивалентный источник синфазных сигналов, U_n – источник сигнала, образованный наводками электромагнитного поля вблизи компьютера

Вторым каналом утечки является линия, образованная сетевым кабелем питания компьютера как целым и общей землей или металлоконструкциями здания (GND на рис. 1). Источником опасного сигнала в этом канале являются наводки, обусловленные электромагнитным полем, излучаемым компьютером. Распространение опасных сигналов, образующихся в результате работы компьютера, удобно рассматривать в виде суперпозиции синфазных и противофазных составляющих, которые распространяются по сетевым проводам питания. Синфазные токи в проводах питания равны и одинаково направлены. В обратном направлении суммарный синфазный ток течет по защитному проводу PE. Противофазные токи в сетевых проводах равны по величине и противоположно направлены. В прямом и обратном направлении они протекают только в сетевых проводах, а в защитном проводе этот ток отсутствует.

Представление сигналов в сетевом кабеле в виде суммы или разности синфазных и противофазных составляющих справедливо для симметричных относительно защитного провода цепей. Симметрия сетевых проводов P1 и P2 относительно защитного провода PE в трехжильном сетевом кабеле (рис. 2 а) выполняется. Симметричными являются сетевой фильтр и разделительный трансформатор. Источник опасного сигнала – выход сетевого блока питания СВТ – имеет на своем выходе помехоподавляющий фильтр симметричной структуры (рис. 2 б). Поэтому и сигналы на выходе можно считать симметричными относительно корпуса СВТ или защитного провода PE. Выходное сопротивление источника на высоких частотах низкое для противофазных сигналов (между проводами P1 и P2 включен конденсатор C2), а для синфазных, наоборот, высокое из-за большого индуктивного сопротивления катушек L1.

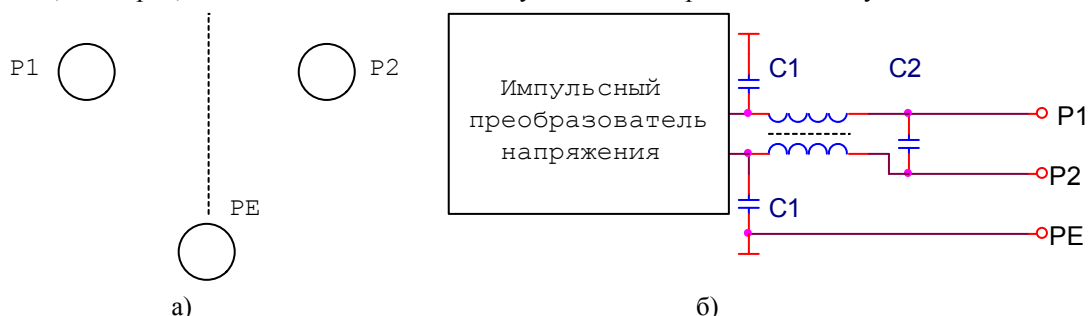


Рисунок 2 – Пояснение свойства симметрии сетевых проводов кабеля относительно защитного провода PE (а) и схема фильтра на выходе сетевого блока питания компьютера (б)

На обобщенной эквивалентной схеме (рис. 1) компьютер включен в первичную сеть электропитания

(один из проводов фаз L1, L2, L3 и нулевой провод N) через сетевой фильтр и разделительный трансформатор. На схеме опасные сигналы на выходе сетевого блока питания представлены в виде источников синфазного U_e и противофазного U_o сигналов. Сигнал, обусловленный наводками электромагнитного поля на провода электропитания, отображен на схеме источником U_n . Сетевой фильтр на схеме для наглядности представлен однозвенным фильтром нижних частот, хотя чаще он состоит из 2-3 подобных звеньев. Конденсаторы C1 включены для пояснения возможного влияния емкостной связи между отдельными участками сетевого кабеля.

Характеристики симметричных защитных цепей (фильтра и трансформатора) можно выразить через параметры их эквивалентных схем для синфазных и противофазных сигналов [1]:

$$S_{11} = (S_{1e} + S_{1o})/2, S_{12} = (S_{1e} - S_{1o})/2, S_{13} = (S_{2e} + S_{2o})/2, S_{14} = (S_{2e} - S_{2o})/2, \quad (1)$$

где S_{1e} и S_{1o} – коэффициенты отражения эквивалентных четырехполюсников, соответствующих синфазным и противофазным сигналам; S_{2e} и S_{2o} – коэффициенты передачи тех же четырехполюсников при синфазных и противофазных сигналах соответственно. Принятая в (1) нумерация соответствует обозначениям входов фильтра, показанных на рис. 1.

Эквивалентная схема компьютера, подключенного к электросети, для синфазных сигналов показана на рис. 3, для противофазных – на рис. 4.

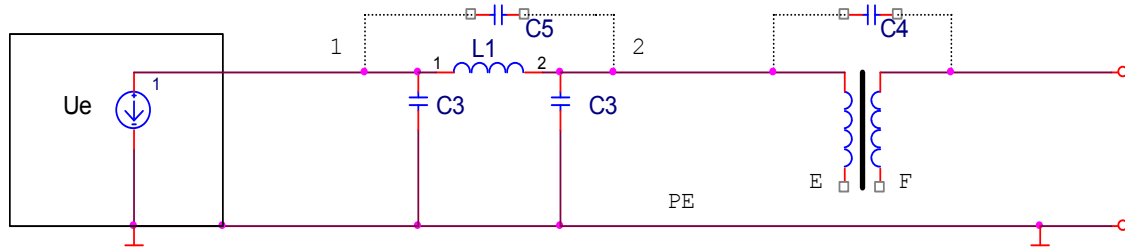


Рисунок 3 – Эквивалентная схема цепи подключения компьютера к сети для синфазных сигналов; емкость конденсаторов C5 равна удвоенной емкости конденсаторов C1 на схеме рис. 1; конденсатор C4 отражает емкостную связь между обмотками трансформатора

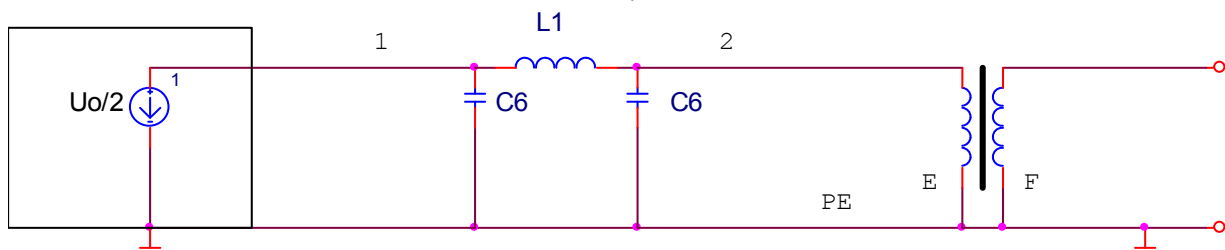


Рисунок 4 – Эквивалентная схема цепи подключения компьютера к сети электропитания для противофазных сигналов; емкость конденсаторов C6 равна сумме удвоенной емкости конденсатора C2 и емкости конденсатора C3 на схеме рис. 1

При синфазных сигналах на входах разделительного трансформатора ток в центре каждой обмотки (точки E и F на рис. 1) отсутствует, поэтому на схеме рис. 3 с одной стороны половинки обмоток трансформатора остаются не подсоединенными. Для противофазных сигналов в центре каждой обмотки трансформатора напряжение равно нулю, поэтому на рис. 4 средние точки обмоток трансформатора соединены с защитным проводником PE.

Эквивалентные схемы, приведенные на рис. 3 и рис. 4, позволяют понять прохождение опасных сигналов, порожденных компьютером, в линию электропитания и рассчитать затухание, вносимое фильтром и разделительным трансформатором.

Вносимое фильтром затухание нормируется для одной пары входа и выхода (например, 1 и 3), при условии, что второй вход и второй выход (2 и 4) нагружаются на согласованные сопротивления (обычно это 50 Ом). Интересующие нас коэффициенты передачи фильтра для синфазных S_{2e} и противофазных S_{2o} сигналов можно связать с заданными значениями коэффициентов передачи S_{13} и S_{24} фильтра. За счет большей емкости конденсаторов эквивалентных фильтрующих звеньев ($C_6 = C_3 + 2 \cdot C_2$, причем $C_2 \gg C_3$)

при одинаковых катушках индуктивности сетевой фильтр ослабляет противофазные сигналы существенно больше, чем синфазные. При условии, что на высоких частотах $|S_{2e}| \gg |S_{2o}|$ искомый коэффициент передачи согласно (1) равен $|S_{2e}| \approx 2 \cdot |S_{13}|$. Это означает, что на высоких частотах затухание фильтра для синфазных сигналов ниже нормируемого приблизительно на 6 дБ, а для противофазных оно должно быть даже больше нормируемого значения.

Типичные сетевые фильтры (М-11, М-13, М-15, ФЗП -103 и др.) имеют частоту среза ≈ 5 кГц. Затухание сигнала на уровне 100–120 дБ они обеспечивают на частотах выше 0.1 – 0.3 МГц, причем этот уровень гарантируется в диапазоне до 1000 МГц.

Согласно нормам [2] уровень высокочастотных помех в сетевых проводах компьютеров не может превышать 10 мВ (80 дБ/мкВ) на частотах выше 0.15 МГц. Дополнительное ослабление их еще на 100–120 дБ практически означает их полное подавление, причем это в равной степени относится и к синфазным, и к противофазным сигналам.

Заметим, что сигналы низких (звуковых) частот сетевым фильтром практически не ослабляются.

С включенным фильтром прохождение опасного сигнала от сетевого провода компьютера в сеть электропитания практически возможно только за счет существования емкостной связи между этими проводами. Эта связь учтена на схеме рис. 1 включением конденсаторов С1, а на эквивалентной схеме рис. 3 – конденсатора $C_4 = 2 \cdot C_1$. На эквивалентной схеме для противофазных сигналов (рис. 4) емкостная связь не учитывается, поскольку наведенные токи с разных проводов взаимно компенсируются.

С целью оценки влияния распределенной емкости связи между входными и выходными (относительно фильтра) подводными проводами было измерено затухание между двумя отрезками трехпроводного сетевого кабеля длиной 1.5 м. Схема измерения показана на рис. 5,а. Режим синфазного возбуждения обеспечивался параллельным соединением сетевых проводов кабеля, а защитный провод служил вторым проводом линии. С другой стороны все три провода сетевого кабеля соединялись вместе. Короткое замыкание имитирует соединение проводов кабеля с сетевым фильтром с низким входным сопротивлением на высоких частотах, – благодаря конденсаторам С3 на входах фильтра (см. рис. 1).

Результаты измерения затухания между двумя отрезками сетевого кабеля длиной 1.5 м каждый приведены на рис. 5,б. Эти результаты показывают, что сетевые провода на высоких частотах могут образовывать эффективный канал утечки сигнала в обход сетевого фильтра. При этом сетевые провода можно представлять как две антенны, которые излучают и принимают синфазные сигналы. Связь между антеннами наибольшая, когда длина антенны будет близка к четверти длины волны сигнала в проводах сетевого кабеля. В частности, для исследованных отрезков кабеля длиной 1.5 м измеренная частота четвертьволнового резонанса была равна 33 МГц. Изменение взаимного расположения отрезков сетевых кабелей существенно не меняет (в пределах ± 4 дБ) характера частотной зависимости, представленной на рис. 5, б.

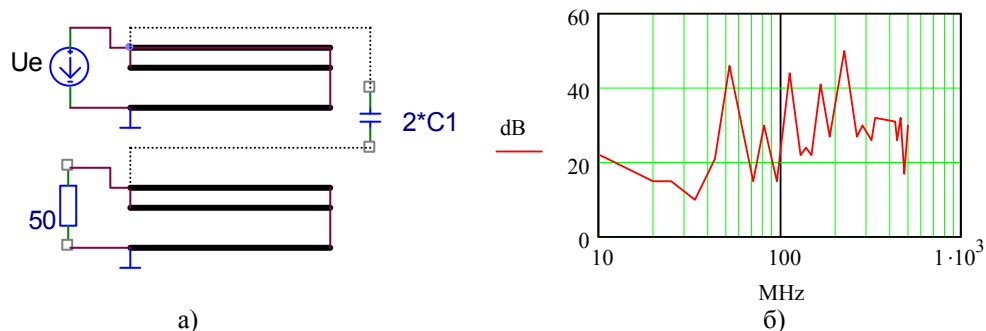


Рисунок 5 – Схема измерения (а) и результаты измерения (б) затухания между двумя отрезками трехпроводного сетевого кабеля длиной 1.5 м, удаленными на расстояние 2 м друг от друга

Таким образом, включение сетевого фильтра еще не гарантирует высокого ослабления опасных сигналов в проводах электропитания. Для ослабления канала связи в обход сетевого фильтра сетевой кабель компьютера необходимо экранировать.

Разделительный трансформатор с изолированными обмотками – еще одна преграда для прохождения опасных сигналов в сеть электропитания. Противофазный рабочий ток частоты 50 Гц, а так же его низшие гармоники трансформатором практически не ослабляются. С ростом частоты начинают влиять распределенные индуктивности рассеивания обмоток и их паразитные емкости, что приводит к ослаблению противофазных сигналов на высоких частотах. Результаты измерения частотной зависимости затухания K_0 в разделительном трансформаторе мощностью 0.7 кВА показаны на рис. 6.

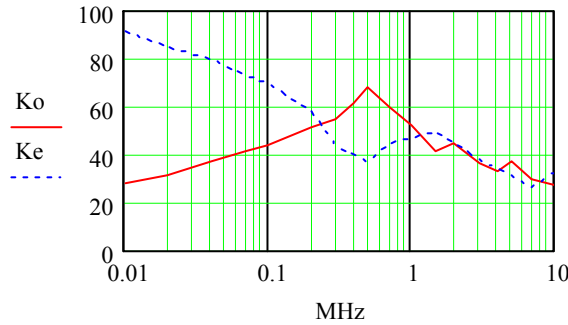


Рисунок 6 – Измеренные характеристики ослабления синфазных Ke и противофазных Ko сигналов в разделительном трансформаторе с разнесенными обмотками и величиной емкости между обмотками около 10 пФ

Синфазные токи низких частот не проходят через разделительный трансформатор, поскольку обмотки изолированы друг от друга, а намагничивающий ток отсутствует (см. рис. 3). С ростом частоты емкостная связь между обмотками трансформатора, которая отображена на схеме рис. 3 конденсатором С4, уменьшает затухание синфазных сигналов Ke.

На частотах выше 200 кГц частотные зависимости вносимого затухания Ke и Ko имеют спады и подъемы, которые обусловлены резонансами, возникающими в обмотках трансформатора. За счет этого уровень ослабления обеих сигналов уменьшается на этих частотах до 20 – 30 дБ.

III Анализ вариантов заземления объекта ЭВТ

Разделительный трансформатор предлагают [3] применять также для защиты объектов ЭВТ от помех в двухпроводной сети электропитания при отсутствии третьего защитного провода. Включение трансформатора и заземление корпуса компьютера, устраняет передачу опасных бросков напряжения помех с нулевого провода электросети на металлический корпус компьютера. Естественно, эта защита эффективна на сравнительно низких частотах.

Способ защиты от помех в сети электропитания подключением объекта ЭВТ в сеть через разделительный трансформатор и заземление провода, соединенного с корпусом компьютера, автоматически переносится и на обратную задачу – подавление опасных сигналов, которые распространяются от компьютера в сеть. Покажем ошибочность такого подхода или его ограниченность.

В старых административных зданиях сеть электропитания не имеет отдельного защитного провода. В таких случаях провод заземления чаще всего прокладывается отдельно от проводов электросети. Индуктивность уединенного провода согласно [4] рассчитывается по формуле

$$L = 2 l [\ln (4 l / d) - k], \text{ [нГн, см]}, \quad (2)$$

где l – длина провода; d – его диаметр.

Значение коэффициента k находится в пределах от 0.75 до 1 и зависит от частоты сигнала. Коэффициент $k = 1$ на высоких частотах и $k = 0.75$ на постоянном токе.

Длина отдельного провода заземления в реальных помещениях редко меньше 10 м. Индуктивное сопротивление провода диаметром 5 мм и длиной 10 м на частоте 1 МГц будет равным 77 Ом. Длина провода заземления становится соизмеримой с длиной волны опасного сигнала и на частотах параллельного резонанса эффективность заземления будет низкой. Более того, этот провод заземления на участке между точками А и D (см. рис. 1) становится эффективной антенной излучения синфазного сигнала. Контур антенны большой площади образован проводами электросети на выходе трансформатора, проводами первичной электросети, участком земли между заземлением нулевого провода и точкой D, проводом заземления на участке AD (см. рис. 2).

Отдельный провод заземления – это и отдельный канал распространения и переизлучения высокочастотных сигналов, порожденных электромагнитным полем данного компьютера (источник сигнала U_n на схеме рис. 1). Этот сигнал распространяется в линии, образованной проводами электропитания (включая и металлический корпус фильтра) и обратным проводом, образованным землей или металлоконструкциями здания. Размеры эквивалентной линии или антенны – десятки метров, ее высота – единицы метров, поэтому эффективное переизлучение будет наблюдаться уже с частот порядка 1 МГц. Закрытие провода заземления металлической трубой только увеличивает эффективную длину антенны (антенна Айзенберга [5]) и на высоких частотах не обеспечивает хорошего экранирования.

Иной результат получается, если третий защитный провод будет проложен до распределительного щитка в составе отдельного трехжильного кабеля и в распределительном щитке этот провод будет соединен с нулевым проводом электросети (зануление защитного провода). На рис. 1 это соединение показано штриховой линией на участке АВ. В трехпроводном сетевом кабеле все провода свиты, расстояние между ними небольшое, поэтому синфазные сигналы практически не излучаются.

Вариант зануления защитного провода не устраняет третий канал утечки сигналов, вызванный источником U_n , но линия, вдоль которой распространяется этот сигнал охватывает участок ВС (см. рис. 1) нулевого провода первичной электросети с помехами от других работающих компьютеров.

Высокий уровень помех в электросети формируется импульсными источниками питания компьютеров, причем в нулевом проводе суммируется помехи от устройств, включенных в разные фазы электросети. Наличие значительного тока высоких частот в нулевом проводе электросети было подтверждено исследованием магнитных полей в здании с числом компьютеров около 50. Высокий уровень магнитного поля был вызван неправильным подключением отдельно проложенного провода заземления. Этот провод был соединен с нулевым проводом электросети в нескольких точках: на входе в здание и на каждом распределительном щитке внутри здания. Обратный ток нулевого провода электросети разделился по двум проводам: проводу заземления (до 1 А) и нулевому проводу электросети. При этом образовались замкнутые контура большой площади, которые создавали магнитное поле излучения высокочастотных помех. Измерения, проведенные сотрудниками НИИЦ «ТЕЗИС», показали, что напряженность магнитного поля в здании достигала значений 0.9 А/м в полосе частот 9 кГц. Максимумы наблюдались на частотах 10, 30 и 50 кГц.

Соединение защитного провода с нулевым проводом электросети позволяет использовать этот высокий уровень помех нулевого провода электросети для зашумления сигнала компьютера, распространяющегося между землей и сетью электропитания. Естественное зашумление формируется похожими сигналами других компьютеров, по структуре оно близко к опасному сигналу, поэтому эффективность зашумления должна быть высокой. Это лучше, чем сначала изолировать опасный сигнал отдельным проводом заземления, а потом включать генератор шума для подавления этого сигнала, который на высоких частотах не только распространяется, но и эффективно излучается протяженной линией электропитания.

IV Выводы

1. Симметрия трехпроводной цепи питания позволяет рассматривать распространение опасных сигналов от объектов ЭВТ по сетевым проводам в виде суперпозиции синфазных и противофазных сигналов.

2. Синфазные и противофазные сигналы высоких частот эффективно подавляются сетевым фильтром с экранированными подводными проводами, а ослабление, вносимое разделительным трансформатором сравнительно небольшое (20...30дБ).

3. Еще один канал утечки образуется за счет наводок электромагнитного поля на сетевые провода. Этот сигнал распространяется вдоль линии, образованной сетевыми проводами и общей землей. Трансформатор и фильтр практически не ослабляют наведенные сигналы.

4. Отдельно проложенный провод заземления вместе с проводами электросети образует на высоких частотах протяженную линию с разнесенными проводами, которая может эффективно излучать синфазные сигналы, распространяющиеся от компьютера.

5. Зануление защитного провода практически устраняет излучение синфазных сигналов, распространяющихся в цепи электропитания, и позволяет зашумлять сигналы, наведенные электромагнитным полем компьютера, помехами нулевого провода электросети.

Литература: 1. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. М.: Связь, 1971. 2. ГОСТ 23450-79 Радиопомехи промышленные от промышленных, научных, медицинских и бытовых высокочастотных установок. Нормы и методы измерений. 3. ГОСТ Р 50571.22-2000 Электроустановки зданий. Требования к специальным электроустановкам. Заземление оборудования обработки информации. 4. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. Н. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. 5. Айзенберг Г. З. и др. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985.