РАСПРОСТРАНЕНИЕ НАВОДОК ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В СЕТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Михаил Прокофьев, Василий Стеченко
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»

Аннотация

Приведены результаты исследования особенностей распространения сигналов в проводах сети электропитания. Показаны пути появлении высокочастотных наводок и причины ослабления уровней сигналов в проводах линий электропитания и заземления.

Abstract

The results of the investigation of signal hropagation in wire power network. The ways of education and the reasons for reducing interference level of signals in the power supply wires and ground.

Ключевые слова: распространения сигналов в проводах электропитания, высокочастотные электромагнитные помехи в сети электропитания.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема электромагнитной совместимости электронных технических средств и сегодня остается актуальной. Рассмотрим некоторые ее аспекты на примере распространения сигналов побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) от средств вычислительной техники (СВТ).

В современных СВТ скорость передачи данных превышает предел 1 Гбит/с, что порождает сигналы ПЭМИ на частотах сотни-тысячи МГц, которые далее могут распространяться проводами сети электропитания.

О возможности использования сети электропитания, как среды распространения высокочастотных (ВЧ) сигналов, свидетельствуют и результаты эксплуатации специальных систем передачи информации проводами сети электропитания, например, системы PLC (powerline communications) [1]. Такая система передает сигналы в диапазоне 11-30 МГц и обеспечивает связь на расстоянии до 100 м. При этом для увеличения дальности передачи используется помехоустойчивое кодирование и передаются относительно высокие уровни сигналов.

Работа СВТ сопровождается появлением ПЭМИ, которые вызывают сигналы наводок на линии сети электропитания. С ростом быстродействия СВТ увеличиваются и частоты наводок на линии сети электропитания. Для таких сигналов сеть электропитания является каналом распространения и источником электромагнитных помех для другой аппаратуры, которая тоже подключается к сети электропитания.

Характеристика путей образования наводок в сети электропитания

Сигналы в сети электропитания возникают благодаря наличию двух каналов – либо прямого прохождения сигналов через фильтрующие цепи блока питания, либо за счет наводок электромагнитного поля излучения. Эти каналы можно считать независимыми, поскольку уровень сигналов в них достаточно мал, а поэтому можно не учитывать

нелинейные процессы и взаимное влияние одного сигнала на другой. Более того, СВТ подсоединяются к сети электропитания, как правило, через помехоподавляющий фильтр, который существенно ослабляет сигналы, поступающие в сеть непосредственно от блока питания.

Для типичного помехоподавляющего фильтра с гарантированным уровнем ослабления сигналов 60 дБ и более можно считать, что на частотах свыше 1 МГц фильтр практически не пропускает напрямую высокочастотные сигналы от блока питания СВТ. На частотах меньших 10 - 100 кГц фильтр меньше ослабляет уровень сигналов, которые напрямую прохождят через помехоподавляющий фильтр. Одновременно с уменьшением частоты снижается и уровень сигнала, обусловленный наводкой электромагнитного поля. Поэтому сигналы таких низких частот в сеть электропитания попадают в основном за счет прямого прохождения с выхода блока питания СВТ.

Требования на электромагнитную совместимость ограничивают уровни ВЧ сигналов в проводах электропитания СВТ на уровне 60 дБ/мкВ [2]. Уровень сигналов за счет их прямого прохождения через фильтр на частотах свыше 100 кГц не должен превышать 0 дБ/мкВ. Для сигналов большего уровня каналом поступления в сеть электропитания является наводки электромагнитного поля ПЭМИ СВТ. Источником излучения (антенной) может быть и неэкранированная часть сетевого кабеля на участке от СВТ до помехоподавляющего фильтра.

Особенности распространения ВЧ сигналов ПЭМИ СВТ

Для частот свыше 1 МГц сеть электропитания является антенной, на которую приводятся сигналы ПЭМИ СВТ. Распределенная антенна чаще образована тремя проводами (фаза, ноль и защитный провод) [3]. В устаревших зданиях сеть электропитания может состоять из двух проводов. Тогда дополнительно может существовать еще однопроводная линия заземления, которая может прокладываться отдельно от проводов сети электропитания.

Учитывая практически одинаковую удаленность всех проводов сети от источника излучения (СВТ), следует считать, что на все провода сети электропитания будут наводиться ВЧ сигналы ПЭМИ СВТ с одинаковой электродвижущей силой. Суммарный ток сигналов наводок можно измерить с помощью измерительного трансформатора, если охватить им все провода сети. Этот ток распространяется в проводах сети электропитания, обратным проводом которой является поверхность земли или различные металлические коммуникации и строительные конструкции здания. Однако сопротивления нагрузки для токов наводок разные для каждого из проводов сети электропитания относительно обратного провода линии и поэтому создаются разные условия для распространения сигнала в каждом из них. Неравенство токов в проводах можно рассматривать как условие существования нескольких модификаций сигнала наводок (мод), которые распространяются уже между отдельными проводами сети электропитания.

Характеристика сети электропитания для суммарного тока сигнала наводок будет приближаться к свойствам однопроводной линии, например - отдельной линии заземления. Прямой и обратный провода такой линии удалены на значительное расстояние друг от друга. Поэтому линия является эффективной антенной, которая одновременно принимает и излучает сигнал наводок ПЭМИ. Уровень электромагнитного поля ВЧ сигнала ПЭМИ в пространстве угасает обратно пропорционально расстоянию от источника сигнала (СВТ), а в линии - по экспоненциальной зависимости. Поэтому окружающее электромагнитное поле наводит ток в линию, а наведенный ток -компенсирует затухание поля. Излучения сигнала является основной причиной высокого уровня затухания сигнала в однопроводной линии. Такая линия подобная антенне бегущей волны [4], которая эффективно излучает или принимает сигналы в широком диапазоне частот при условии, что его длина превышает длину волны сигнала.

Характер изменения тока в однопроводной линии в зависимости от частоты и для разных участков линии приведен на рис. 1.

Исследовалась линия длиной 20 м, а измерение уровня тока проводились на удалении от источника сигнала 0,2 м (кривая 1), 5 м (кривая 3) и 10м (кривая 2). Исследуемая однопроводная линия была проложена на бетонном полу помещения и одним концом подсоединялась к выходу генератора. Ток в линии измерялся с помощью измерительного трансформатора.

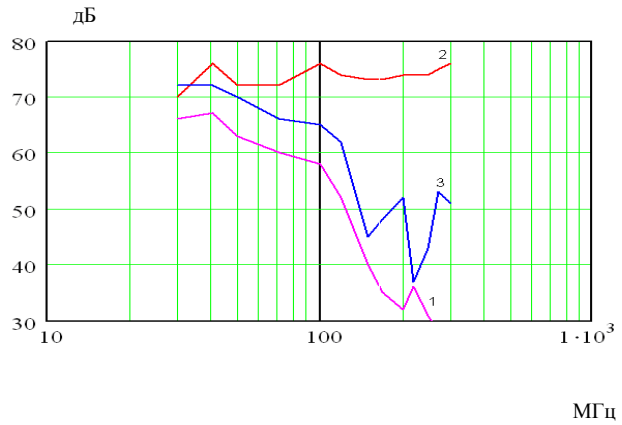


Рис. 1. *Частотная зависимость тока наводок ПЭМИ СВТ в однопроводной линии*

Причиной резкого увеличения уровня затухания тока на высоких частотах (при больших значениях отношения длины линии к длине волны сигнала) является излучение, уровень излучения которого зависит от отношения длины линии к длине волны сигнала, чем и объясняются отдельные подъемы и провалы в частотной зависимости уровня тока для однопроводной линии. Распространено мнение, что СВТ необходимо обязательно заземлять для снижения уровня ПЭМИ. При этом заземление на объектах часто выполняется отдельным проводом большого сечения длиной в десятки метров.

Оценить эффективность отдельной линии, как «заземлителя» на частотах свыше 10 МГц, позволяют результаты исследований, приведенных на рис. 2. Измерялся ток, наведенный на противовес штыревой излучающей антенны на расстоянии 5 м от начала линии «заземлителя». Частотная зависимость тока измерялась для трех вариантов соединения исследуемой линии длиной 20 м: один конец линии подсоединялся к противовесу штыревой антенны, а второй оставался открытым (красная линия); второй конец подключался к линии заземления здания (синяя). Для третьего варианта второй (дальний) конец оставался открытым, а ближний конец отсоединялся от противовеса антенны (розовая линия). На частотах свыше 15 МГц ток в линии практически не зависит от величины сопротивления на конце линии (его значение бесконечно большое для открытого конца и составляет единицы Ом для варианта подключения к заземлению).

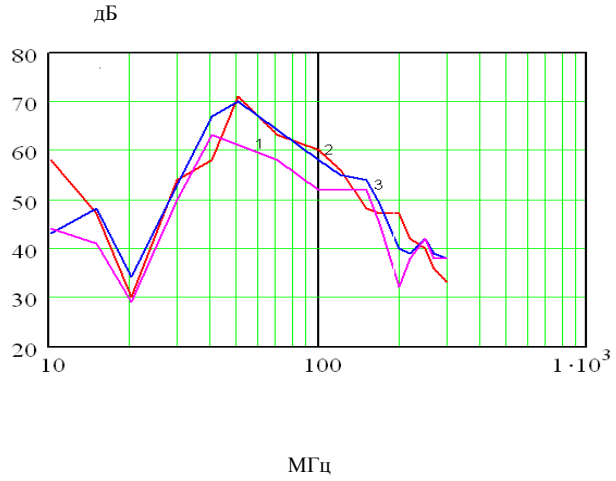


Рис. 2. *Частотная зависимость эффективности отдельной линии, как «заземлителя» для наводок ПЭМИ*

На частотах свыше 10 МГц значение наведенного тока практически не зависит и от наличия или отсутствия соединения начала линии с источником излучения (красная и розовая линии на рис 2). Эти результаты подтверждают вывод, что на высоких частотах уровень тока, наведенного электромагнитным полем, существенно превышает ток, поступающий напрямую от СВТ даже при отсутствии помехоподавляющих фильтров.

В сети электропитания, состоящей из двух проводов, кроме суммарной моды тока может существовать еще сигнал симметричной моды, прямым и обратным проводами которого является фазный и нулевой провода сети. Для сигнала симметричной моды

ток в каждом проводе одинаковый по амплитуде, но противоположный по направлению. Поэтому такую моду часто называют еще противофазной. Симметричная мода распространяется между проводами, которые проходят параллельно на малом расстоянии друг от друга. Уровень излучения сигнала такой моды на порядки меньше чем уровень излучения сигнала, вызванного суммарной модой. Одновременно и внешнее электромагнитное поле вызывает очень малый уровень наводок симметричной моды.

На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости уровня сигнала наводок суммарной и симметричной мод от частоты. Определение уровня тока наводок проводилось в начале двухпроводной линии длиной 20 м, а сама линия была проложена на бетонном полу помещения. Исследуемая линия соединялась с противовесом штыревой антенны, источником электромагнитного поля излучения. На другом конце линия была нагружена на сопротивление 100 Ом, значение которого близко к волновому сопротивлению линии для симметричной моды сигнала. На рис. 3 кривая 2 отображает зависимость суммарной (кривая 3 – симметричной) моды наведенного сигнала, а кривая 1 изображает зависимость тока симметричной моды в начале линии после отключения одного провода от противовеса антенны.

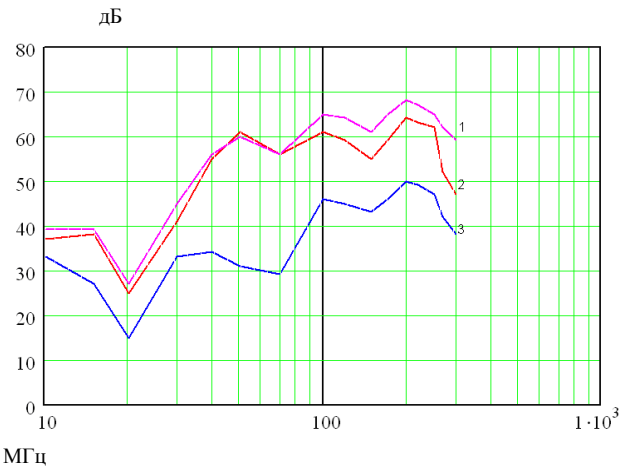


Рис. 3. *Зависимость значения тока, наведенного сигналами ПЭМИ СВТ, от частоты*

Анализ полученных результатов исследования (рис.3) позволяет сделать вывод о том, что значение тока суммарной моды на 10-30 дБ превышает уровень тока симметричной моды. Основной причиной появления симметричной моды в линии является трансформация суммарной моды сигнала наводок за счет неодинаковой нагрузки различных проводов линии. Отключение одного провода линии от противовеса антенны существенно нарушает симметрию на входном конце двухпроводной линии. Благодаря этому уровень симметричной моды тока увеличивается (розовая линия на рис.3)

В однородной линии (в отдельном сетевом кабеле) сигнал распространяется с относительно малым уровнем затухания (до 1 дБ/м на частотах до 300 МГц). Для реальных сетей электропитания уровень ослабления сигналов превышает 40 дБ на расстоянии до 100 м уже на частотах 10-30 МГц. Высокий уровень затухания сигнала симметричной моды объясняется влиянием многократного отражения волны от многочисленных отводов древовидной по структуре сети электропитания. При этом характер распространения симметричного сигнала наводок ПЭМИ в линии приближается к режиму стоячих волн, что и обусловливает значительное затухание сигнала.

Оценку влияния ответвлений на уровень затухания симметричной моды сигнала рассмотрим на примере линии с одним ответвлением, схема которой приведена на рис. 4. Исследуемая линия нагружена на сопротивление R2, значение которого равно волновому сопротивлению линии. Поэтому в такой линии есть только один источник отраженной волны - это ответвление линии с комплексным сопротивлением нагрузки Z. Время распространения сигнала в такой линии длиной 10 м составляет $\tau = 125$ нс.

Коэффициент отражения сигнала такой линии в точках **а** и **б** определяется выражением:

$$\Gamma = e^{-2j\omega\tau} * (1-\rho / Z) / (1 \rho / Z)$$

где $\tau = \sqrt{\varepsilon}\mathbf{l_i/c}$ - время распространения сигнала в ответвлении, l_i - его длина.

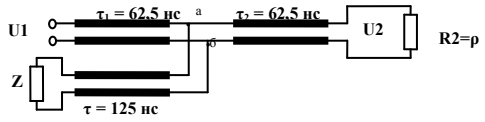


Рис. 4. *Схема линии сети електропитания с одним ответвлением*

На рис. 5 приведены результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи с одним ответвлением, схема которого приведена на рис.4, для четырех значений сопротивления нагрузки: кривая 1 - Z = ∞ (ненагруженный отрезок линии), кривая 2 - Z = 0, кривая 3 - Z = 3ρ, кривая 4 - Z = ρ (согласованная нагрузка). Отражение сигнала в ответвлении приводит к появлению значительной частотной неравномерности АЧХ цепи. АЧХ для линий без потерь является периодической функцией, период которой Fп определяется временем распространения сигнала в ответвлении τ:

$$Fп = 1 / \tau$$

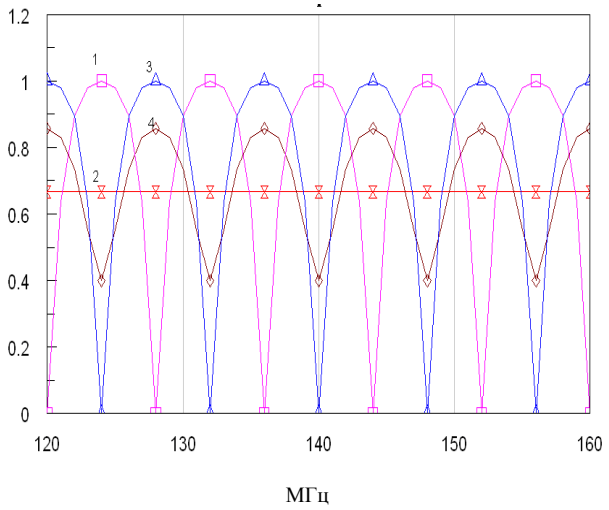


Рис. 5. *Частотная зависимость коэффициента передачи цепи с одним ответвлением*

Для сигнала наводок, спектр которого находится в полосе частот от fн до fв, среднее значение мощности сигнала P определяются по выражению:

$$P = \int_{fн}^{fв} S^2(f)df$$

где S (f) - спектральная плотность сигнала наводок.

Результаты численного интегрирования для сигнала с равномерной спектральной плотностью S (f) свидетельствуют о том, что наличие ответвления может вызывать в полосе частот шириной $F_п$ изменение значения среднего ослабления мощности сигнала в пределах 1,75 - 3,5 дБ. Уровень ослабления 1,75 дБ соответствует режиму стоячих волн в ответвлении, а 3,5 дБ - соответствует режиму согласованной нагрузки ответвления. Режим смешанных волн, возникающий вследствие несогласованной нагрузки (зависимость 3 на рис.5), характеризуется промежуточными значениями среднего уровня ослабления сигнала. Стоячая волна вызывает глубокие провалы в АЧХ. Ширина этих провалов по уровню $K_f<0,3$ или $K_f^2<0,1$ составляет $\Delta f_{мін} = 0,1/\tau$.

Подключение или отключение от сети отдельных устройств меняет эквивалентную длину ответвлений и приводит к смещению значений частотных провалов в АЧХ. Следствием этого является зависимость уровня сигналов наводок ПЭМИ в сети электропитания от ее состояния и невозможности корректного определения уровня ослабления сигнала в сети электропитания при проведении испытаний на конкретной частоте. В первую очередь это касается определения уровня наводок от специально созданных тестовых сигналов в СВТ, спектр которых имеет линейчатую структуру.

Влияние неравномерности АЧХ и зависимости этой неравномерности от состояния сети электропитания значительно уменьшается в случае определения уровня сигнала с широким спектром $\Delta Fc >> 1 / \tau$. Спектр такого сигнала охватывает несколько периодов АЧХ и изменение ослабления отдельных составляющих спектра сигнала наводок почти не влияет на значение мощности сигнала в полосе частот шириной ΔFc.

Наибольшие изменения среднего уровня сигнала будут тогда, когда задержка сигнала в ответвлении достигает значения $\Delta\tau = 0, 25/\Delta Fc$ (в полосе частот шириной ΔFc количество периодов АЧХ изменяется на 0,25).

Средняя мощность сигнала изменяется на 0,8 дБ, если $\Delta Fc = 1 / \tau$. Для сигнала, ширина спектра которого в n раз превышает период АЧХ $Fп = 1/\tau$, зависимость среднего уровня сигнала от изменения времени задержки сигнала в ответвлении уменьшается до 0,8/n дБ. Эти изменения практически не влияют на результаты испытаний, поскольку их погрешность превышает 1 дБ.

Увеличение числа ответвлений в сети приводит к еще большей неравномерности АЧХ сети и соответственно увеличивается средний уровень ослабления сигнала в сети. Период АЧХ сети увеличивается и его значение зависит от соотношения временных задержек сигнала в отдельных ответвлениях. В вывод о малой чувствительности изменения уровня мощности сигнала с широким спектром от числа ответвлений остается в силе. Определить средний уровень сигнала с широким спектром возможно только путем определения его уровня на многих частотах в полосе ΔFc. Количество точек по частоте определяется при проведении испытаний. Сначала определяется уровень ослабления на средней частоте спектра сигнала и на средних частотах двух половин спектра и так далее, пока количество точек, для которых проводится определение значений уровней сигналов наводок, не будет существенно влиять на результаты вычислений среднего значения Kf2 в полосе ΔFc.

В трехпроводной сети электропитания количество независимых мод увеличивается до четырех. В случае выполнения условий симметрии - одинакового расположения нулевого и фазного провода относительно защитного провода (провода заземления) количество мод, которые следует учитывать при оценке уровня сигнала наводок ПЭМИ в сети электропитания, можно уменьшить до трех. Кроме суммарной моды и симметричной моды, как в двухпроводной линии, появляется несимметричная мода, то есть две одинаковые моды, которые характеризуют сигналы, распространяющиеся между защитным проводом и нулевым и между защитным проводом и фазным проводами. Характеристики симметричной линии состоящей из трех проводов для симметричной и несимметричной мод мало отличаются, но это не касается уровней наводок сигнала ПЭМИ.

К сети электропитания часто подсоединяются и бытовые устройства, имеющие два провода питания. Двухпроводный кабель таких устройств является дополнительной антенной, которая увеличивает уровень наводок сигналов несимметричной моды. Опыт определения уровня наводок в сети электропитания позволяет сделать вывод, что уровень несимметричной моды на 10-15 дБ выше уровня симметричной.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ

На достаточно высоких частотах (свыше 10 МГц) электрические сигналы помех в проводах сети электропитания появляются преимущественно за счет наводок электромагнитного поля ПЭМИ СВТ. Контроль уровня сигналов ПЭМИ по электромагнитному полю вблизи СВТ и проводов сети электропитания позволяет косвенно контролировать и уровни высокочастотных помех в проводах сети электропитания. Древовидная структура сети электропитания вызывает многократные переотражения сигналов, что приводит к изрезанности АЧХ и появлению глубоких провалов на отдельных частотных интервалах. Из-за подключения и отключения отдельных приборов структура сети меняется во времени, что приводит для узкополосных сигналов к изменению АЧХ сети электропитания и смешению областей частот с малыми и большими уровнями затухания. Изменения структуры сети существенно меньше влияют на флуктуации уровня широкополосного сигнала с полосой в десятки-сотни МГц.

С ростом частоты уровень затухания высокочастотных сигналов в проводах сети электропитания увеличивается. В первую очередь это касается однопроводной линии, которую часто применяют для заземления СВТ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Морриси П. Реализация технологии PPL. Сети и системы связи, 2005 г., № 12, С. 79-81;

[2] ГОСТ Р51318.22-99 Радиопомехи индустриальные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний;

[3] Стеченко В.М, Найденко В.І., Прокофьєв М.І., Курашкевич А.М. Анализ защиты объектов ЭВТ от утечки по цепям питания и заземления //Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Випуск 1(14), 2007 – К.; с 160 – 165;

[4] Айзенберг Г.А. и др. Коротковолновые антенны. – М. Радио и связь, 1985 г.