

УДК 621.316.1

И. З. Климов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
А. Л. Шишкин, аспирант, Ижевский государственный технический университет

МОДЕЛЬ ШУМОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Проведен анализ шумов низковольтных электросетей общего пользования, по результатам которого построена их модель. Данная модель подразумевает, что шумы в электросетях представляют собой сумму трех типов помех, и позволяет описать основные свойства каждого типа при помощи небольшого числа параметров.

Ключевые слова: низковольтные электросети общего пользования, модель шумов низковольтных электросетей.

Существующие PLC-системы (power line communication systems), работающие в диапазоне частот 3...148,5 кГц, имеют низкую скорость передачи информации (единицы или десятки кбит/с) и малую надежность. Это прежде всего связано с использованием в них видов модуляции, изначально разработанных для каналов связи, по своим свойствам сильно отличающихся от электрических сетей. Чтобы улучшить характеристики PLC-систем, необходимо при выборе схемы модуляции и помехоустойчивого кодирования учитывать особенности современных электросетей. Наряду с затуханием сигнала, вызванного потерями в электропроводке, уровень и характер шумов в электросети определяют основные технические параметры PLC-систем. На данный момент уже существуют труды, посвященные анализу помех в электросетях, но в них либо описание шумов проведено при помощи большого числа параметров [1], либо шумы рассматриваются в области высоких частот (до 30 МГц) [2, 3], возможность использования которых в нашей стране ограничена [4]. Поэтому цель данной работы состоит в создании модели шумов электросетей в диапазоне от 3 до 150 кГц, которая бы состояла из небольшого числа параметров.

Предлагаемая модель шумов

После обработки порядка 1000 спектрограмм, полученных при собственных измерениях [5], и анализа работ других авторов можно сказать, что шумы электросетей сильно отличаются от аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и их в общем случае можно представить в виде совокупности трех типов помех: фоновых, узкополосных и импульсных (рис. 1).

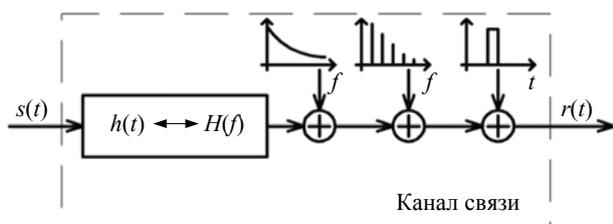


Рис. 1. Упрощенная модель электросети

Тогда модель шумов будет выглядеть как сумма трех слагаемых:

$$n(t) = n_{\text{фон}}(t) + n_{\text{уз}}(t) + n_{\text{имп}}(t).$$

Чтобы синтезировать какой-либо из трех типов помех, воспользуемся методом, который описан в [3, 6]. Данный метод применяется, когда необходимо сформировать случайный процесс с заданным видом спектральной плотности мощности. Такой процесс получают путем пропускания АБГШ через некоторый формирующий фильтр, который рассчитывают исходя из того, что характеристики входного и выходного сигналов известны. Спектральная плотность мощности сигнала на выходе фильтра определяется выражением

$$S_y(\omega) = |W(\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (1)$$

где $S_y(\omega)$, $S_x(\omega)$ – спектральная плотность мощности выходного и входного сигнала соответственно; $|W(j\omega)|^2$ – квадрат модуля частотной характеристики фильтра. При использовании в качестве входного сигнала белого шума с $S_x(\omega) = S_0$ получим, что АЧХ искомого фильтра определяется выражением

$$W(\omega) = \sqrt{\frac{S_y(\omega)}{S_0}},$$

а его импульсная характеристика находится как обратное преобразование Фурье от его передаточной характеристики:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{S_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{S_y(\omega)} e^{j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

Белый шум с нормальным распределением можно получить, например, в среде *Matlab*:

$$> \text{noise} = \sigma \cdot \text{randn}(65536, 1);$$

% σ – желаемое среднеквадратическое отклонение шума.

Фоновые помехи

На рис. 2 приведен пример типового распределения спектра мощности шума в бытовой электросети в случае отсутствия в ней мощных импульсных и узкополосных помех. Огибающую фоновых помех приближенно можно описать при помощи экспоненциальной функции первого порядка:

$$n_{\text{фон}}(f) = N_0 + N_1 \cdot \exp\left(-\frac{f}{f_1}\right), \quad (3)$$

где N_0 – некоторый постоянный уровень шума; N_1 и f_1 – неизвестные коэффициенты.

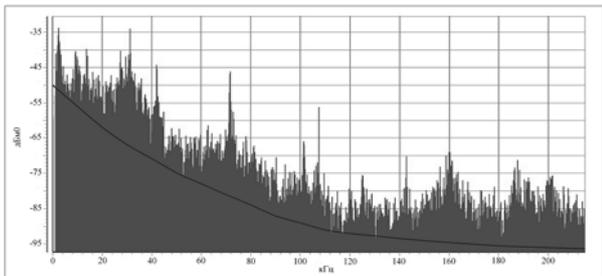


Рис. 2. Аппроксимация спектра мощности фоновых шумов

Воспользовавшись методом наименьших квадратов, находим, что уравнение показанной на рис. 2 огибающей имеет вид

$$n_{\text{фон}}(f) = -100 + 55 \cdot \exp\left(-\frac{f}{59000}\right).$$

Если теперь перейти от спектра мощности к амплитудному спектру по методу, описанному выше, а затем сделать обратное ДПФ от данного амплитудного спектра, то получим импульсную характеристику фильтра, формирующего фоновые помехи.

Узкополосные помехи

В общем случае узкополосные помехи можно представить в виде суммы N -го числа независимых синусоид:

$$n_{\text{уз}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \sin(2\pi f_i t + \varphi_i).$$

В этом случае каждая синусоида будет характеризоваться собственной частотой f_i , фазой φ_i и амплитудой $A_i(t)$. При этом амплитуда может быть как постоянной, так и представлять собой некоторый низкочастотный процесс, спектр которого сосредоточен в окрестности нулевой частоты. Начальная фаза каждой из синусоид может быть выбрана произвольно из интервала $[0; 2\pi]$ и не должна изменяться со временем.

Чтобы не усложнять программный код, для генерации узкополосных помех воспользуемся методом, который был применен для формирования фоновых помех. Для этого спектр мощности узкополосных помех представим в виде суммы экспоненциальных функций:

$$n_{\text{уз}}(f) = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \exp\left(-\frac{|f-f_{0,i}|}{f_{1,i}}\right). \quad (4)$$

Число слагаемых в уравнении (4) определяется числом пиков в спектре шума. Характеристики каждого такого пика приближенно можно описать при помощи амплитуды A_i , центральной частоты $f_{0,i}$ и коэффициента $f_{1,i}$, определяющего его форму.

Импульсные помехи

Импульсные помехи – это регулярные или случайные последовательности «мешающих» импульсов во временной области, возникшие вследствие побочных эффектов работы некоторых приборов или резкого изменения потребляемого из сети тока. Опираясь на результаты собственных измерений и на результаты, приведенные в [2], можно сказать, что импульсный шум – это некоторый узкополосный случайный процесс со скачкообразным изменением амплитуды (рис. 3).

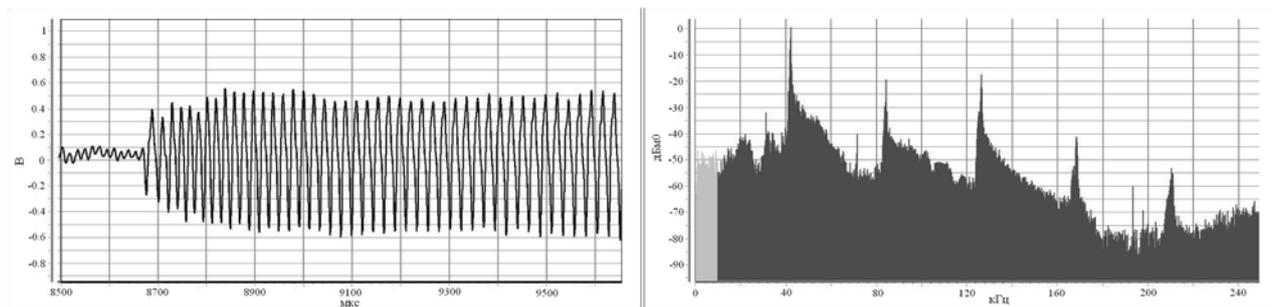


Рис. 3. Фрагмент импульсной помехи и ее спектр мощности

Амплитуда, скважность и период импульсных помех являются случайными величинами, статистические характеристики которых были исследованы в [2] при помощи пикового детектора и представлены на рис. 4. По результатам исследований было определено, что около 90 % импульсных помех имеют амплитуду огибающей от 100 до 200 мВ

и только 1 % имеет амплитуду больше 2 В. Длительность импульса обычно имеет значение порядка нескольких десятков микросекунд. Импульсы продолжительностью более 500 мкс наблюдались лишь в 1 % случаев. Импульсные помехи с частотой повторения 50–100 Гц, т. е. идущие синхронно с напряжением электросети, встречаются наиболее

часто и были зафиксированы в 30 % измерений. Помехи с периодом повторения более 200 мс со-

ставляют лишь десятую часть от всех периодических импульсных помех.

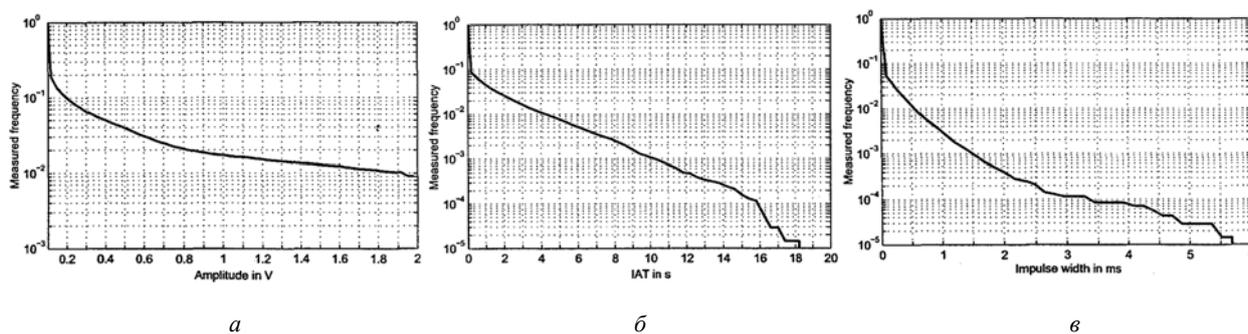


Рис. 4. Закон распределения параметров импульсных шумов [2]: а – амплитуды; б – длительности импульсов; в – периоды повторения импульсов

Для синтеза импульсных помех было решено использовать метод, который основывается на следующем алгоритме.

1. Генерация последовательности прямоугольных импульсов с случайным периодом, скважностью и амплитудой.

2. Генерация случайного процесса с заданным видом спектральной плотности мощности и нормированной амплитудой.

3. Умножение сгенерированного случайного процесса на полученную последовательность прямоугольных импульсов.

За амплитуду случайного процесса примем такой уровень, для которого вероятность появления меньшего по модулю значения будет больше чем 0,9. Для того чтобы нормировать по этому критерию амплитуду сгенерированного дискретного случайного процесса рассчитаем его среднеквадратическое отклонение σ^2 (среднюю мощность) по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N n(i)^2.$$

Как показано в [8] дисперсия σ_{out}^2 выходной последовательности нерекурсивного фильтра связана с дисперсией σ_{in}^2 входной последовательности соотношением

$$\sigma_{out}^2 = \sigma_{in}^2 \sum_{i=1}^m b_i^2,$$

где b_i – коэффициенты дискретного фильтра.

Поэтому если на вход нерекурсивного фильтра подать гауссовский шум, то и на выходе получим также гауссовский шум. Это предположение о характере высокочастотного заполнения импульсных шумов согласуется с экспериментальными результатами, полученными в [1], и позволяет по справочным таблицам определить отношение между дисперсией и заданной выше амплитудой случайного процесса.

Результаты моделирования

Выше была приведена методика, позволяющая получить простую в сравнении с [1, 2] модель шумов. Эта модель была описана при помощи небольшого количества параметров. Посредством данных параметров возможно изменять уровень мощности шумов, центральную частоту и ширину полосы отдельных узкополосных помех, а также генерировать импульсные помехи с желаемыми статистическими характеристиками. В качестве примера на рис. 5 представлен результат моделирования в среде MATLAB [7] шума со спектральной плотностью мощности, заданной рис. 2. Из этого примера видно, что результат моделирования является суммой двух случайных процессов, имитирующих фоновые и узкополосные шумы.

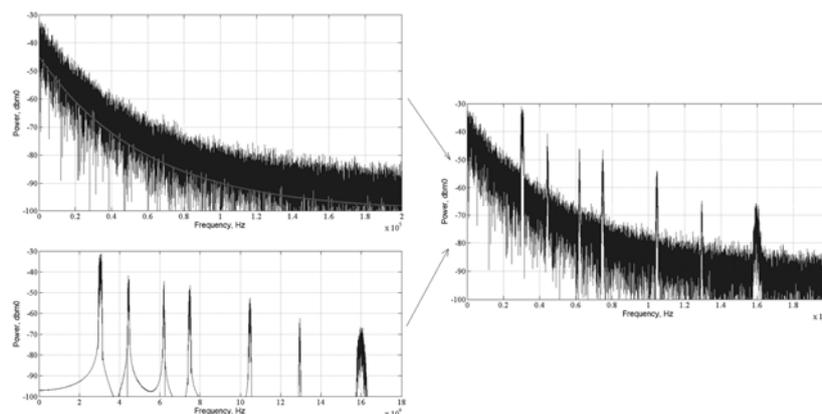


Рис. 5. Спектральная плотность мощности смоделированных фоновых, узкополосных шумов, а также их суммы

На рис. 6 приведена реализация импульсных помех, идущих с частотой 50 Гц и амплитудой 0,5 вольта. Данная реализация получена как результат умножения регулярной последовательности прямоугольных импульсов на шум со спектром мощности, приближенным к показанному на рис. 3, и нормированной дисперсией.

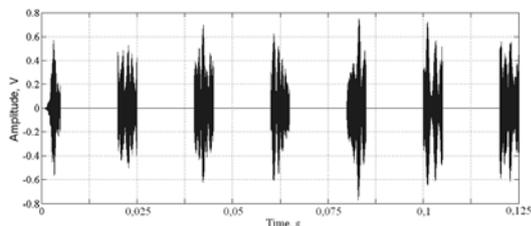


Рис. 6. Результат моделирования импульсных шумов

Библиографические ссылки

1. *Katayama M., Yamazato T., Okada H.* A Mathematical Model of Noise in Narrowband Power Line Communication

Systems // IEEE Journal on Selected Areas In Communications. – Jul. 2006. – Vol. 24. – No. 7. – P. 1267–1276.

2. *Zimmermann M., Dostert K.* An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks // Proceedings of ISPLC. – 2000. – P. 131–138.

3. *Benyoucef D.* A new statistical model of the noise power density spectrum for Powerline communication // Proceedings of ISPLC. – 2003. – P. 136–141.

4. ГОСТ Р 51317.3.8–99 (МЭК 61000-3-8-97).

5. *Шишкина А. Л.* Измерение параметров сетей общего назначения переменного тока напряжением до 0,4 кВ // 12-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение»: материалы докладов. Т. 2. – М.: Типография ООО «Инсвязьиздат», 2010. – С. 195–197.

6. *Прохоров С. А.* Математическое описание и моделирование случайных процессов / Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 209 с.

7. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

8. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

I. Z. Klimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

A. L. Shishkin, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

A Noise Model of Residential Low Voltage Power Line Network

The low-voltage power line noise is analyzed and a noise model based on the analysis results is represented. According to this model the power line noise corresponds to a total of three types of disturbances, each can be described by few parameters.

Key words: power line communication, power line noise model.

УДК 621.317.738

Е. Д. Макшаков, аспирант, Сарапульский политехнический институт (филиал) Ижевского государственного технического университета

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ В РЕЛАКСАЦИОННОМ АВТОГЕНЕРАТОРНОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Предложен способ снижения погрешности измерения емкости, основанный на температурной коррекции периода релаксационного автогенераторного преобразователя. Работа направлена на оптимизацию релаксационных измерительных преобразователей для систем контроля емкостно-резистивных датчиков. Схема содержит микроконтроллер, датчик температуры, эквивалентный RC-двухполюсник.

Ключевые слова: RC-двухполюсник, релаксационный автогенераторный преобразователь, микроконтроллер, датчик температуры, температурная коррекция.

Релаксационные автогенераторные измерительные преобразователи параметров емкостно-резистивных датчиков находят широкое применение при построении измерительных средств, используемых во влагометрии различных материалов, включая нефть, древесину, сельскохозяйственные продукты, продукты пищевой промышленности. К достоинствам таких преобразователей можно отнести достаточное быстродействие, устойчивость и простоту. Главным недостатком является сильная зависимость выходного информационного сигнала

от температуры окружающей среды. Обусловлено это, как правило, нестабильностью элементов, составляющих электрическую схему измерительного преобразователя, главным образом начальной емкости автогенератора (АГ).

Разрешить проблему можно, применив метод прямой или косвенной компенсации или метод стабилизации. Метод прямой компенсации предполагает подключение к конденсатору частотозадающего двухполюсника АГ дополнительного управляемого конденсатора. Варьируя его емкость, стабилизируют