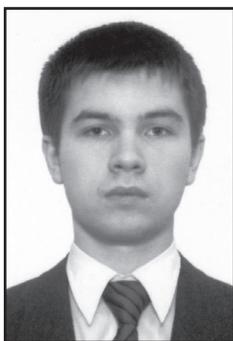


# Расчет спектров цифровых электросигналов



Дмитрий КАШИН

Dmitry I. KASHIN

***В технике связи для тестирования цифровых каналов и трактов широко применяются цифровые сигналы с фиксированной и псевдослучайной структурами. Автором предложен метод моделирования и расчета характеристик спектральной плотности мощности стандартных цифровых тестовых электрических сигналов для различных способов линейного кодирования. В качестве моделей исходных (первичных) их образований использованы стандартные бинарные последовательности фиксированной и псевдослучайной структур. Как аналитический инструмент метод пригоден для исследования влияния линейного кодирования и форматов модуляции на качество передачи данных в высокоскоростных сетях транспортной связи.***

***Ключевые слова:*** техника связи, цифровые каналы, тестовые сигналы, тестовые последовательности, модель сигнала, спектральная плотность мощности.

*Кашин Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

**П**редставление в аналитическом виде характеристик спектральной плотности мощности (СПМ) цифровых тестовых сигналов позволяет решать множество задач. Прежде всего это касается оценки качества передачи данных в каналах и трактах сетей связи в зависимости от выбранных способов линейного кодирования сигналов.

Для математического описания их структуры нами на кафедре разработана модель генератора бинарных тестовых сигналов.

В тестовых сигналах с фиксированной структурой (ФС) вида R логических единиц/нулей на K битов структура размещения битов на цикле передачи постоянна.

Например, тестовые последовательности вида «одна логическая единица на восемь битов» имеет структуру 10000000, а последовательность «две логические единицы на восемь битов» – 10001000.

Псевдослучайная структура (ПСП) представляет собой условно стохастическую последовательность размещения битов на цикле передачи, сформированную по заданному алгоритму.

Стандартные полиномы, задающие структуру ПСП, описаны в рекомендациях МСЭ-Т

Таблица 1/Table 1

Характеристики тестовых псевдослучайных последовательностей,  
рекомендуемых МСЭ-Т

Characteristics of test pseudorandom sequences recommended by ITU-T

Количество триггеров, $M$ Number of triggers, $M$	Длина ПСП, бит Length of PS, bits	Количество бит в последовательности Number of bits in sequence	Рекомендуемая скорость передачи тестируемых данных, кбит/с Recommended transfer speed of the test data kbit / s	Область применения тестовых сигналов Scope of test signals	Полином, описывающий структуру ПСП Polynomial that describes the structure of PS	Рекомендация Recommendation
6	$2^6-1$	63	64; 32; 16	Низкоскоростные каналы передачи данных/ Low-speed data channels		МСЭ-Т / ITU-T O.151
9	$2^9-1$	511	До/ up to 14,4	Вторичные сети передачи данных/ Secondary data transfer network	$D^5 + D^9 = 0$	
11	$2^{11}-1$	2047	64; $n \cdot 64$ ( $n=1 \dots 31$ ); от/ from 48 до/ to 168		$D^9 + D^{11} = 0$	
15	$2^{15}-1$	32767	1544; 2048; 6312; 8448; 32064; 44736	Цифровые каналы связи PDH/ digital communication channels PDH	$D^{14} + D^{15} = 0$	
20	$2^{20}-1$	1048575	1544; 6312; 32064; 44736 До/ up to 72	Высокоскоростные цифровые каналы связи (например, STM-N) / High-speed digital communication channels (for example, STM-N)	$D^{17} + D^{20} = 0$ $D^3 + D^{20} = 0$	МСЭ-Т / ITU-T O.153
23	$2^{23}-1$	8388607	34368; 44736; 139264		$D^{18} + D^{23} = 0$	
29	$2^{29}-1$	536870911	Отсутствует/No	Тестирование высокоскоростных каналов связи/ Testing of high speed communication channels	$D^{27} + D^{29} = 0$	МСЭ-Т / ITU-T O.150
31	$2^{31}-1$	2147483647	Отсутствует/No		$D^{28} + D^{31} = 0$	

О.150-О.153. Основные параметры и области применения ПСП сведены в таблицу 1 [1-3].

Например, при тестировании каналов и трактов цифровых сетей связи, использующих технологию Ethernet, применяются короткие псевдослучайные последовательности длиной  $2^7-1$  бит, а высокоскоростных – длиной до  $2^{23}-1$  бит.

Структура ПСП полностью задается следующими параметрами [1, 2]:

- длиной цикла передачи  $L$ , бит (количеством битов в цикле передачи ПСП);
- образующим полиномом вида  $D^M + D^k$

$= 0$ , описывающим структуру ПСП на цикле передачи.

Длина цикла передачи (количество битов) ПСП определяется выражением:

$$L = 2^M - 1, \text{ бит},$$

где  $M$  – параметр ПСП, характеризующий степень образующего полинома.

На рис. 1 представлен пример временной диаграммы цифрового тестового сигнала, заданного ПСП длиной  $L$  бит. Длительность цикла передачи ПСП составляет  $T_{\text{ПСП}}$  с, длительность передачи одного бита –  $T_{\text{бит}}$  с.



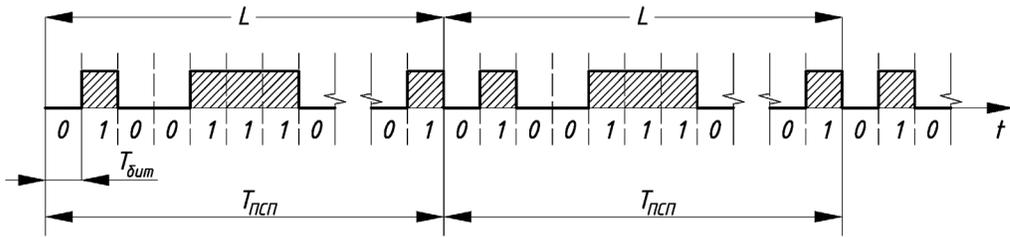


Рис. 1. Пример временной диаграммы тестового сигнала, заданного псевдослучайной последовательностью.

Pic. 1. Example of timing diagram of the test signal, predetermined by pseudo random sequence.

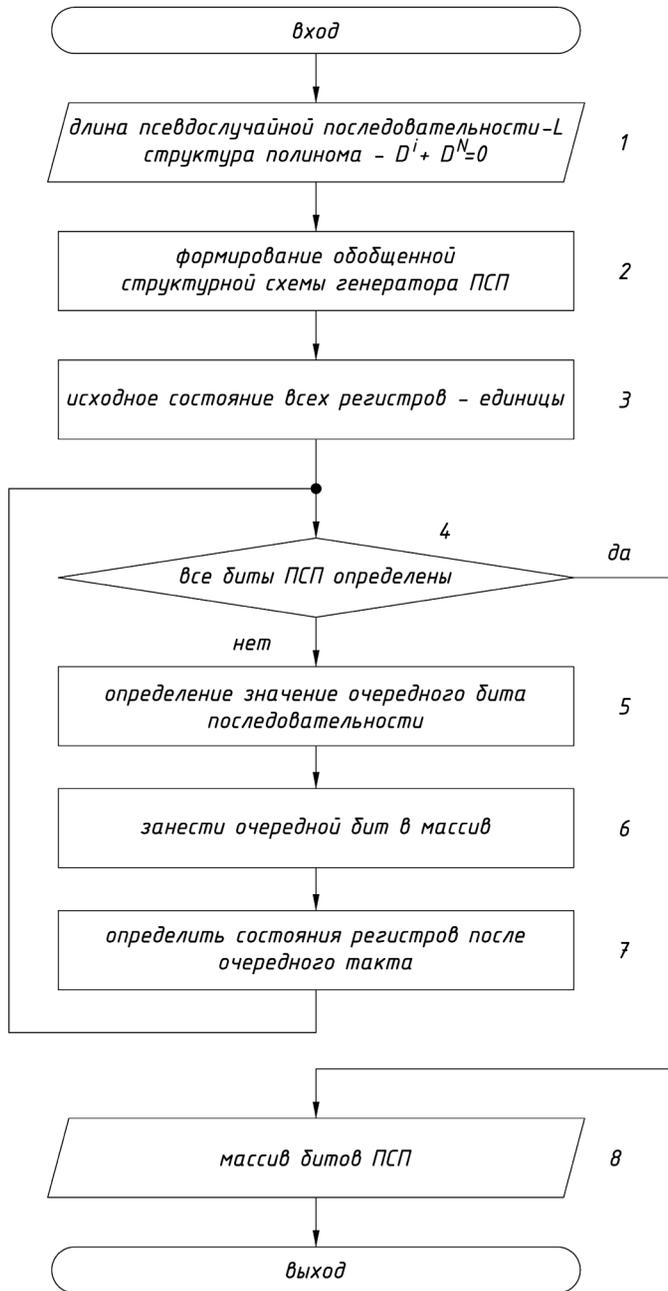


Рис. 2. Алгоритм формирования структуры ПСП.

Pic. 2. Algorithm for generating the structure of PS.

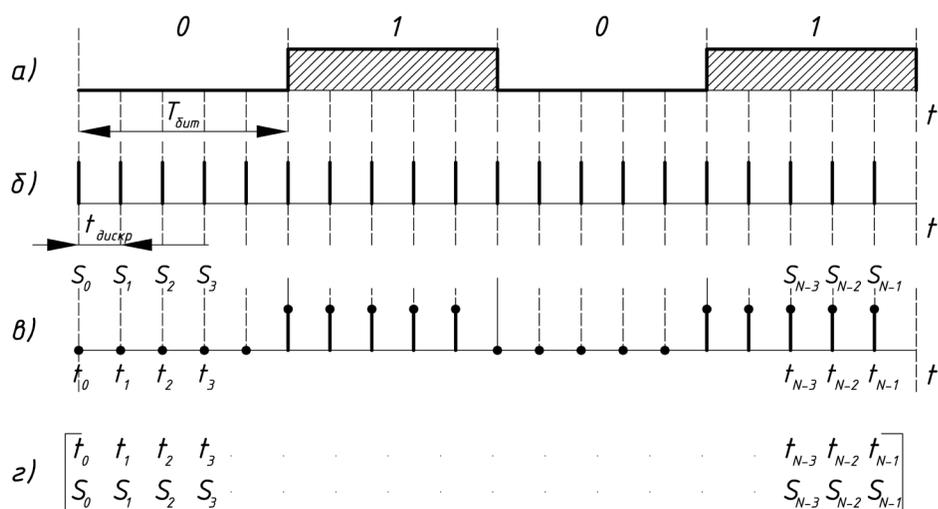


Рис. 3. Иллюстрация этапов расчета амплитудного спектра цифрового тестового сигнала: а) поток импульсов тестового сигнала; б) поток дискретизирующих импульсов; в) сигнал, дискретизированный по времени; г) двумерный массив отсчетов цифрового тестового сигнала.

Рис. 3. Illustration of calculation steps of the amplitude spectrum of digital test signal: a) pulse flow of test signal; b) flow of sampled pulses; c) signal sampled over time; d) two-dimensional array of digital test signal samples.

На рис. 2 представлен разработанный алгоритм моделирования структуры ПСП. Результат алгоритма – сформированная логическая структура ПСП на цикле передачи.

Расчет СПМ тестового сигнала производится методом дискретного преобразования Фурье:

$$S(f_k) = \sum_{k=0}^{N-1} S(t_k) W^{kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

где  $W = \exp\left(\frac{-2\pi i}{N}\right)$ ,  $S(t_k)$  – массив дискретных значений тестового сигнала,

$N$  – количество отсчетов тестового сигнала, которые рассчитываются по формуле:

$$N = \frac{L T_{\text{dum}}}{\Delta t},$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации сигнала.

Последовательность проведения вычислительных операций следующая:

- преобразование логической структуры тестовой последовательности во временную функцию с использованием программных средств MathCad;

- формирование массива значений модельного времени  $T = [T_0, T_1, T_2, \dots, T_{M-1}]$  и массива значений цифрового сигнала  $S = [S_0, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}]$ , взятых в моменты вре-

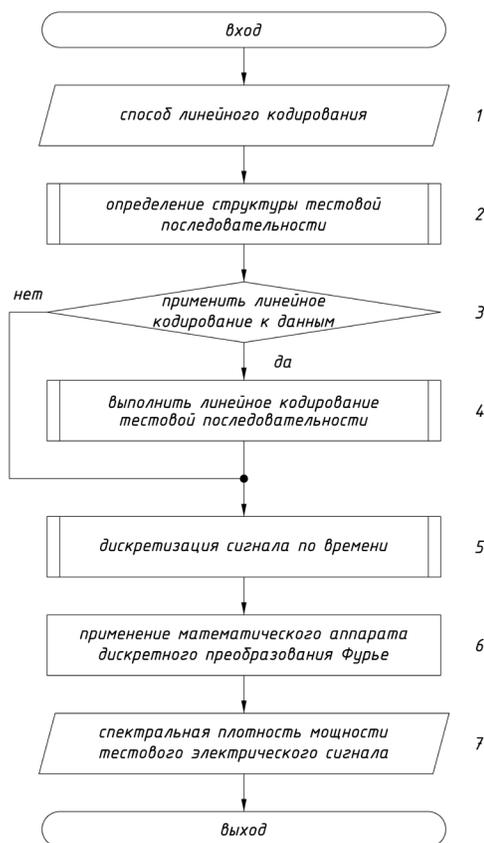
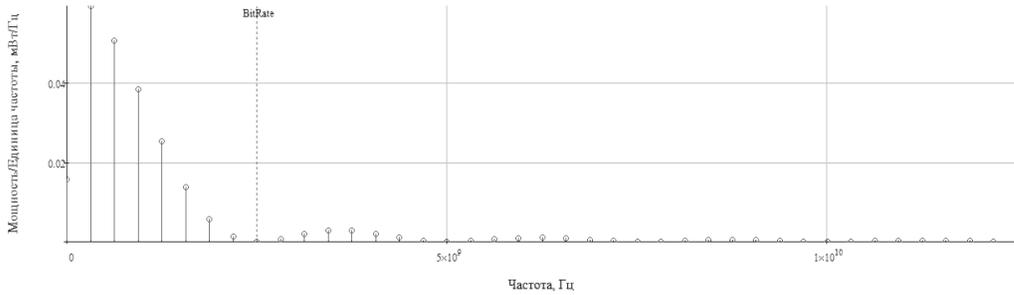


Рис. 4. Алгоритм расчета характеристик СПМ тестового сигнала.

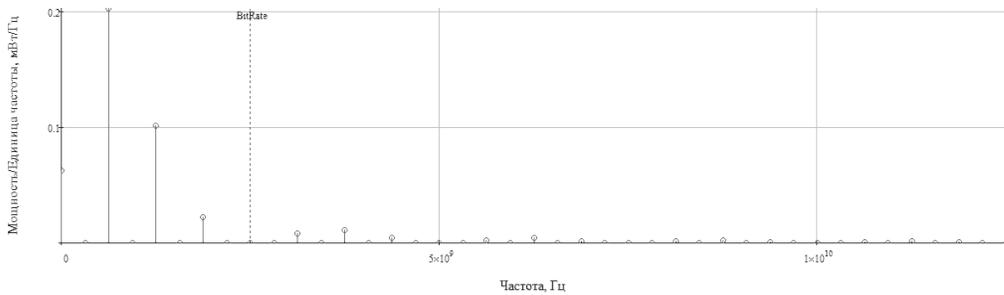
Рис. 4. Algorithm for calculating the PSD characteristics of the test signal.





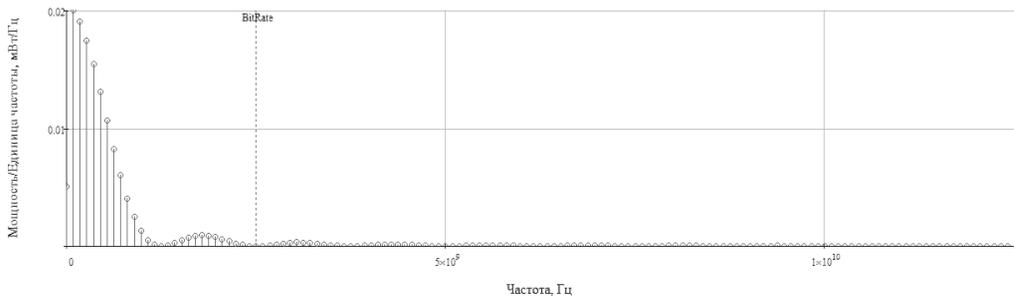
**Рис. 5.** Изображение СПМ тестового сигнала, заданного фиксированной тестовой последовательностью вида «одна логическая единица на восемь битов».

**Pic. 5.** PSD of test signal, specified by fixed test sequence form «one logical unit of eight bits».



**Рис. 6.** Изображение СПМ тестового сигнала, заданного фиксированной тестовой последовательностью вида «две логические единицы на восемь битов».

**Pic. 6.** PSD of test signal, specified by fixed test sequence form «two logical units of eight bits».



**Рис. 7.** Изображение СПМ тестового сигнала, заданного псевдослучайной тестовой последовательностью полинома вида  $D^{27} + D^{29} = 0$ .

**Pic. 7.** PSD of test signal, specified by pseudo-random test sequence of polynomial of the form  $D^{27} + D^{29} = 0$ .

мени  $[0, \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots, (M-1) \cdot \Delta t]$ ;

— временная дискретизация импульсов тестового сигнала и формирование двумерного массива данных (отсчетов сигнала) вида  $[t_i; S_i]$ ;

— расчет амплитудного спектра тестового сигнала с использованием массива данных  $[t_i; S_i]$  и аппарата дискретного преобразования Фурье;

— расчет характеристик спектральной плотности мощности тестового сигнала.

Перечисленные этапы расчета иллюстрирует рис. 3.

В соответствии с приведенными этапами преобразования цифрового тестового сигнала разработан алгоритм расчета параметров СПМ сигнала (рис. 4).

В результате выполнения вычислительных операций ДПФ формируется одномерный массив комплексных чисел, являющихся значениями амплитуд соответствующих спектральных составляющих исход-

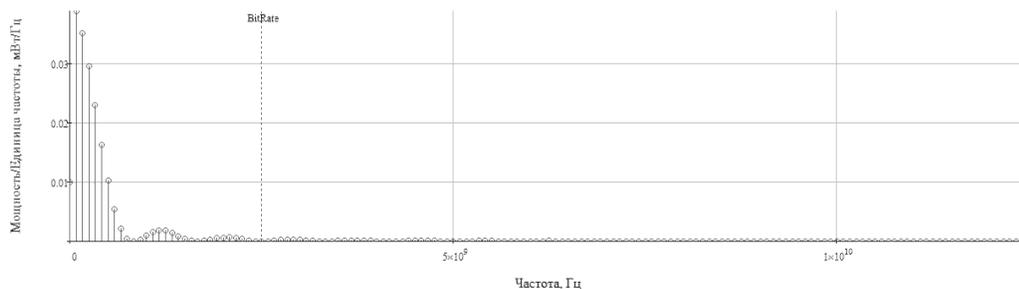


Рис. 8. Изображение СПМ тестового сигнала, заданного псевдослучайной тестовой последовательностью полинома вида  $D^{28} + D^{31} = 0$ .

Pic. 8. PSD of test signal, specified by pseudo-random test sequence of polynomial of the form  $D^{28} + D^{31} = 0$ .

ного цифрового тестового сигнала. Аргументы представляют собой их начальные фазы. Совокупность амплитуд и значений частот становится амплитудным спектром сигнала, а совокупность значений начальных фаз и частотных – фазовым спектром сигнала [4].

Для расчета спектральной плотности мощности сигнала необходимо учитывать пиковые значения напряжений каждой спектральной составляющей и сопротивление входного интерфейса передатчика:

$$P(f_k) = \frac{S(f_k)^2}{R}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N/2,$$

где  $R$  – сопротивление входного интерфейса передатчика.

Результаты расчета характеристик СПМ тестовых сигналов, заданных некоторыми фиксированными и псевдослучайными последовательностями, приведены на рис. 5–8.

В заключение следует отметить, что помимо прочего предложенная методика моделирования и расчета характеристик СПМ цифровых тестовых сигналов является аналитическим инструментом. Он дает возможность исследовать влияние методов линейного кодирования и форматов модуляции оптических сигналов на качество передачи данных по каналам и трактам высокоскоростных цифровых сетей. И это тоже немаловажная функция научного обеспечения техники связи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендация МСЭ-Т O.150. General requirements for instrumentation for performance measurements on digital transmission equipment (05.96).
2. Рекомендация МСЭ-Т O.151. Error performance measuring equipment operating at the primary rate and above (11.88)
3. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 264 с.
4. Прахов В. И. Спектры сигналов с цифровым кодированием. – М.: Спутник+, 2011. – 452 с. ●

## CALCULATION OF DIGITAL ELECTRICAL SIGNALS SPECTRUM

*Kashin, Dmitry I.* – Ph.D. student at the department of railway automatics, automatic remote control and communications of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

### ABSTRACT

In communications technology for testing of digital channels and links are widely used digital signals with fixed and pseudorandom structures. The author proposes a method for simulating and analyzing the characteristics of the power spectral density of standard test digital electrical signals for different methods of linear coding. As models of their initial (primary) formations are used standard binary sequences of fixed and pseudorandom structures. As an analytical tool the method is suitable for studying the effect of the linear coding and modulation formats on the quality of data transmission in high-speed networks of transport links.

### ENGLISH SUMMARY

**Background.** Representation in the analytical form the characteristics of power spectral density (PSD) of digital test signals allows solving many problems. This relates primarily to assess the quality of data transmission in channels and links of communication networks, depending on the selected methods of linear signal coding.

For the mathematical description of their structure at the department a model of binary test signal generator has been developed.

**Objective.** The author aims at describing a method for simulating and analyzing the characteristics of the power spectral density of standard test digital electrical signals for different methods of linear coding.

