



МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ С ПРОТОКОЛОМ ТСП: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Карпухин А.В.<sup>1</sup>, Грицив Д.И.<sup>2</sup>, Ткаченко А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники,

<sup>2</sup>Харьковский Национальный Университет имени В.Н. Каразина,

<sup>3</sup>ПАО «Укртелеком»

В работе предложен новый подход к моделированию компьютерных сетей с протоколом ТСП [1]. Несколько ТСП-соединений, сосуществующих в одном канале, представляются, как ансамбль нелинейных математических маятников, описываемых системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} x_1'' + \omega_1^2 \sin x_1 &= \Phi_1(t, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ x_2'' + \omega_2^2 \sin x_2 &= \Phi_2(t, x_1, x_3, \dots, x_n) \\ x_i'' + \omega_i^2 \sin x_i &= \Phi_i(t, x_1, x_3, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n'' + \omega_n^2 \sin x_n &= \Phi_n(t, x_1, x_2, x_3, \dots), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_i$  – количество пакетов в секунду в  $i$ -м ТСП-соединении,  $\Phi_i$  – функция, зависящая от битрейта (bitrate) каждого ТСП-соединения и, кроме того, определяющая взаимное влияние ТСП-соединений друг на друга,  $\omega_i^2$  – “собственная частота” ТСП-соединения, которая зависит, в первую очередь, от размера буфера, пропускной способности и задержки канала, в котором взаимодействуют все  $n$  ТСП-соединений.

Исходя из физических соображений, начальные условия должны быть заданы в виде

$$\begin{aligned} (x_1)_{t=0} = x_1^0, (x_2)_{t=0} = x_2^0, \dots, (x_i)_{t=0} = x_i^0, \dots, (x_n)_{t=0} = x_n^0; \\ (x_1')_{t=0} = 0, (x_2')_{t=0} = 0, \dots, (x_i')_{t=0} = 0, (x_n')_{t=0} = 0, \end{aligned}$$

где  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0, \dots, x_n^0$  – начальные значения независимых переменных.

Взаимодействие соседних ТСП-соединений можно описать в виде  $\alpha_i \prod_1^n x_k$ , где в каждом произведении для  $i$ -го соединения отсутствует член с номером  $i$ , а  $\alpha_i$  определяет степень влияния различных ТСП-соединений на  $i$ -е соединение. В первом приближении можно считать эту величину одинаковой для всех ТСП-соединений, но в действительности эта величина также, очевидно, зависит от РТТ различных ТСП-соединений.

Собственная частота ТСП-соединения может быть определена как

$$\omega_i^2 = \frac{C_{fi} B}{d_b},$$

где обозначения параметров совпадают с ранее введенными ( $C_{fi}$  – скорость передачи в  $i$ -м соединении, Мб/с,  $d_b$  – задержка канала, мс), а вместо  $Q_s$  используется параметр  $B$  – минимальный размер буфера в узком месте (в пакетах).

Функции  $\Phi_i$  имеют вид

$$\Phi_i(t, x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = A_i \sin(\Omega_i t) + \alpha_i \prod_{k=1}^n x_k \quad k \neq i,$$

где первый член представляет собой гармоническую возмущающую силу с постоянной амплитудой  $A_i$ , зависящей от битрейта (bitrate) каждого  $i$ -го ТСП-соединения, и частотой

