

**С.А. Даденков, Е.Л. Кон**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

**ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ  
LONWORKS-СЕТИ НА ОСНОВЕ  
PREDICTIVE P-PERSISTENT CSMA-ПРОТОКОЛА**

*Решается задача оценки и анализа производительности Lon-сети, содержащей узлы различных уровней приоритета. Представлены аналитические соотношения для расчёта основных характеристик производительности. Выполнены количественная оценка и анализ производительность сегмента Lon-сети. Сделан вывод о целесообразности использования приоритетов в LonWorks.*

*LonWorks* – одна из ведущих технологий построения распределённых информационно-управляющих систем (РИУС). Наиболее широкое распространение технология получила в области автоматизации зданий и технологических процессов промышленных предприятий.

*LonWorks* является системой реального времени, поэтому одной из её основных характеристик является производительность. Сложность оценки производительности Lon-сети связана с множеством факторов и параметров, которые требуют учёта в моделях сетей. Основными факторами, оказывающими влияние на производительность Lon-сети, являются задержки прикладного уровня *LonTalk*, связанные с циклической проверкой условий наступления событий и выполнением инструкций программы, задержки канального уровня *LonTalk*, связанные с конкуренцией узлов за канал, межпроцессорные задержки, связанные с получением доступа к определённому процессору, общая загруженность сети и другие параметры, связанные с ограничениями на передачу сообщений. Анализ публикаций, посвящённых анализу производительности *LonWorks*, выявил, что одним из основных факторов, оказывающих существенное влияние на производительность сети, является алгоритм множественного доступа к среде передачи прогнозирующего псевдопостоянного (predictive p-persis-

tent) CSMA-протокола. Этот факт обусловлен тем, что уровень доступа определяет результирующую производительность сети в случае низких скоростей передачи и длинных пакетов и требует учёта в случае высоких скоростей передачи и коротких пакетов, когда производительность сети в значительной мере определяется быстродействием *Neuron Chip* [1, 2]. Сложность оценки производительности Lon-сети на основе уровня доступа к среде обусловлена множеством параметров, требующих учёта в моделях сетей: интенсивностью формирования и обслуживания сообщений узлами сети, неоднородностью потока с различными типами и размерами сообщений, различными уровнями приоритетов, параметрами алгоритма доступа к среде и другими. В известных работах [3, 4] решается задача оценки производительности без учёта приоритетов в сети. Данная работа направлена на решение задачи оценки и анализа производительности сегмента Lon-сети с приоритетами, что позволит учитывать в моделях сетей трафик различного приоритета – телеуправления (ТУ), телесигнализации (ТС), телеизмерения (ТИ), передачи данных (ПД) и, как следствие, получить более точные результаты моделирования.

### 1. Исходные данные для анализа производительности сети

В данной работе для оценки и анализа производительности сети используются аналитические выражения, полученные в работе «Исследование производительности алгоритма доступа к среде predictive p-persistent CSMA-протокола». Основные формулы, используемые в работе, представлены ниже.

Вероятность коллизии в системе определяется формулой:

$$p_{\text{coll}}(n) = 1 - \sum_{l=0}^{l_{\max}} \left[ n_l \cdot \sum_{s=1}^{W \cdot k} p_{\text{succ}(1)}^{W \cdot k, l, s}(n) \right], \quad (1)$$

где

$$p_{\text{succ}(1)}^{W \cdot k, l, s}(n) = I(s > l) \frac{1}{W \cdot k} \left( \frac{W \cdot k - s}{W \cdot k} \right)^{n_l - 1} \prod_{r=0 \& \neq l}^{l_{\max}} D(s > r), \quad (2)$$

$$I(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{если выполнено условие } (\cdot), \\ 0, & \text{если условие } (\cdot) \text{ не выполнено,} \end{cases} \quad (3)$$

$$D(\cdot) = \begin{cases} \left( \frac{W \cdot k - s + r}{W \cdot k} \right)^{n_r}, & \text{если выполнено условие } (\cdot), \\ 1, & \text{если условие } (\cdot) \text{ не выполнено.} \end{cases} \quad (4)$$

Среднее количество слотов, выбираемых в случае успешной и неудачной передачи,

$$d_{\text{succ}}(n) = \sum_{s=1}^{W \cdot k} \frac{s \cdot \left[ \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} n_l \cdot p_{\text{succ}(1)}^{W,k,l,s}(n) \right]}{1 - p_{\text{coll}}(n)}, \quad (5)$$

$$d_{\text{coll}}(n) = \sum_{s=1}^{W \cdot k} \left( \frac{s}{W \cdot k} \right)^{\sum_{l=0}^{s-1} n_l - 1}. \quad (6)$$

Средняя продолжительность пакетного цикла

$$\tau = \beta_1 + [d_{\text{coll}}(n)p_{\text{coll}}(n) + d_{\text{succ}}(n)p_{\text{succ}}(n) - 1]\beta_2 + PktLength\beta_3. \quad (7)$$

Среднее время задержки доступа к каналу

$$t_{\text{mean}} = \frac{\tau}{n} \cdot \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} \frac{n_l}{p_{\text{succ}(1)}^l} - PktLength\beta_3. \quad (8)$$

Исходные данные для вычисления представленных параметров производительности:

– данные протокола:

- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – временные интервалы,
- $W$  – ширина базового состязательного окна (CO),
- $k = BL$  – уровень отставания (backlog) в сети;

– данные сегмента сети;

- $n, n_l$  – количество активных узлов в сети и количество активных узлов с приоритетом  $l$ ,
- $l_{\text{max}}$  – максимальное количество приоритетных слотов в системе,
- $PktLength$  – длина пакета в битах.

Все указанные исходные данные на протяжении времени функционирования сегмента сети носят неизменный характер, за исключением количества активных узлов, конкурирующих за канал, и параметра отставания канала. Поэтому для выполнения оценки и анализа производительности необходимо рассматривать устойчивое состояние сети со средним количеством активных узлов в сети и средней величиной отставания. Для нахождения устойчивого состояния системы применяется аналитическая модель изменения величины отставания канала в сети с постоянным средним количеством активных узлов, представленная в работе [3].

Система ограничений используемой модели основана на следующих основных положениях:

- сеть состоит из одного сегмента и содержит в среднем  $n$  активных узлов-соперников за канал, сеть находится в насыщенном состоянии, то есть предполагается, что канал всё время занят передачей и не содержит свободных пакетных циклов;

- тип сообщений – одноадресный (unicast), адреса назначения передаваемых сообщений равномерно распределены между узлами сети,

- тип сервиса обмена сообщениями – с подтверждением (acknowledgement);

- канал бесшумен, то есть физический уровень не вводит несогласованность в подсчёт отставаний и все приёмопередатчики сети способны обнаружить коллизии.

В рамках используемой модели зададимся исходными данными, и выполним моделирование для расчёта отставания канала при конкретной нагрузке на систему. Рассмотрим сегменты сети двух типов – с приоритетами и без приоритетов. Сеть *LonWorks* является событийно-ориентированной, это означает, что в такой сети нет постоянной конкуренции большого числа узлов. По этой причине в работе исследуются сегменты сети со средним количеством узлов  $n$ , равным 2 и 16. Для этого количества узлов и представленной системы ограничений с помощью модели [3] получены значения отставания. Исходные данные для детального анализа производительности исследуемых сегментов сети представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для анализа производительности сегмента сети

Наименование	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$W$	$k$	$l$	$n(n_i)$	$PktLength$ (бит)
	(мкс)							
Сегмент без приоритетов	868	168	12.8	16	1,3	0	2	96
					2,0		16	
Сегмент с приоритетами	868	168	12.8	16	< 1,3	0,4	2	$n_0 n_4$
						0,2		1 1
					< 2,0	0,4	16	$n_0 n_4$
						0,2		8 8
							$n_0 n_2$	
							4 12	
	Среда передачи Twisted pair (TP/FT-10) ANSI/CEA-709.3							

Выбранные исходные данные позволяют исследовать влияние использования механизма приоритизации на производительность сегмента сети при различной степени загруженности канала.

## 2. Анализ производительности сегмента сети *LonWorks*

Представленные в работе аналитические соотношения громоздки и имеют высокий уровень вычислительной сложности. Поэтому для выполнения полноценной оценки и анализа производительности сегмента сети разработана и использована программа в среде математического моделирования *scilab*.

Для выполнения оценки производительности исследуемых сегментов сети необходимо произвести расчёт и сравнительный анализ следующих показателей производительности:

- вероятность успешной/неудачной передачи;
- среднее количество слотов при успешной/неудачной передаче;
- средняя задержка доступа к каналу.

### 2.1. Вероятность успешной/неудачной передачи

Произведём оценку вероятности коллизии для исследуемых систем. Проиллюстрируем характер изменения вероятности коллизии в зависимости от величины отставания канала на рис. 1 и сведём полученные результаты в табл. 2.

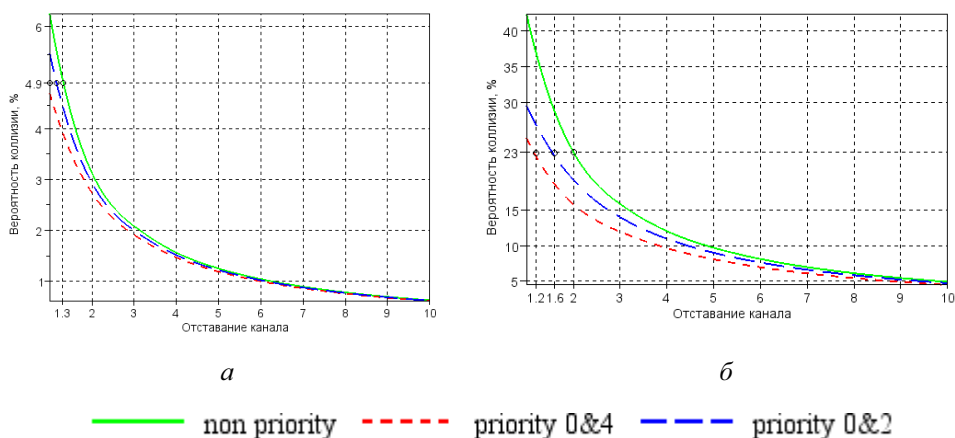


Рис. 1. График изменения вероятности коллизии:

$$a - n = 2; \quad б - n = 16$$

Таблица 2

## Результаты вычисления вероятности коллизии и отставания канала

Наименование	$PrSlots$	$n (n_i)$	$k (BL)$	$p_{succ}, \%$	$p_{coll}, \%$
Сегмент без приоритетов	0	2	1,3	95,1	4,9
		16	2,0	77,1	22,9
Сегмент с приоритетами	0, 4 0, 2	2 (1, 1)	1,0	95,1	4,9
			1,16		
		16 (8, 8)	1,2	77,1	22,9
		16 (4, 12)	1,6		

Анализ характера изменения вероятности коллизии позволяет сделать следующие основные выводы:

- уменьшение вероятности коллизии с ростом числа параметра  $k (BL)$  при постоянном количестве активных узлов в сети обусловлено значительным уменьшением вероятности выбора узлами одинаковых номеров слотов при ширине состязательного окна ( $W \cdot k$ ). Для систем с приоритетами вероятность выбора слотов с одинаковыми номерами смещается в сторону слотов с большими номерами, поэтому вероятность коллизии в системе ниже, чем в системе без приоритетов, при одинаковой ширине СО. Влияние приоритетов в системе с ростом ширины состязательного окна снижается;

- в работе [3] показано, что изменение уровня отставания канала происходит при определённой частоте коллизий в сети. Уровень, до которого происходит изменение отставания канала, заложен разработчиками протокола доступа в алгоритм подсчёта отставаний, чувствителен к значению ширины базового состязательного окна и системе приоритетов. Очевидно, что если в системе без приоритетов устанавливается уровень отставания при определённой вероятности коллизий, то и для системы с приоритетами вероятность коллизий сохраняется при прочих равных условиях;

- при больших значениях отставания канала вероятность коллизии для систем остаётся практически неизменной малой величиной, что обусловлено малым числом конкурирующих за канал устройств при большой ширине состязательного окна.

## 2.2. Среднее количество слотов при успешной/неудачной передаче

Произведём расчёт и анализ среднего числа слотов в случае успешной/неудачной передачи для случая приоритетных и неприоритетных систем (рис. 2) и систематизируем полученные результаты в табл. 3.

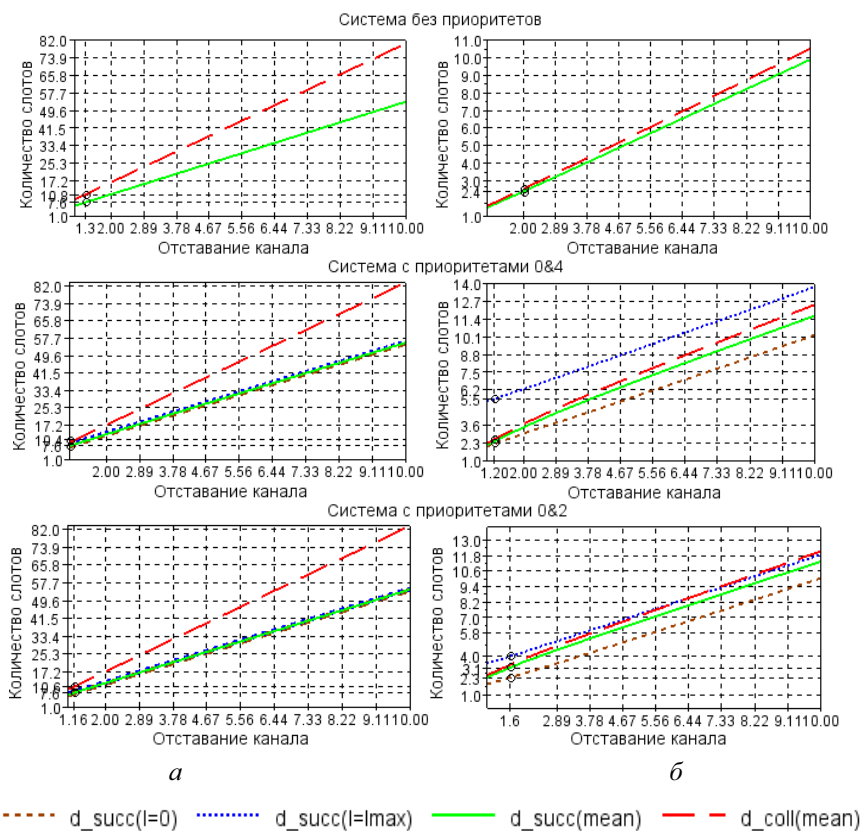


Рис. 2. График изменения среднего количества слотов при передаче

Таблица 3

Среднее количество слотов при успешной/неудачной передаче

Наименование	$PrSlots$	$n (n_i)$	$k (BL)$	$d_{succ} (d_{succ}^i)$	$d_{coll}$
Сегмент без приоритетов	0	2	1,30	7,60	10,80
		16	2,00	2,39	2,54
Сегмент с приоритетами	0, 4	2 (1, 1)	1,00	7,60	10,30
	0, 2		1,16	7,60	10,60
	0, 4	16 (8, 8)	1,20	2,45 (2,30; 5,50)	2,62
	0, 2	16 (4, 12)	1,60	3,15 (2,35; 4,05)	3,37

Анализ полученных графиков:

– с ростом величины отставания линейно возрастает среднее число слотов, выбираемых при успешной/неудачной передаче, что обусловлено линейным изменением ширины состязательного окна ( $W \cdot k$ );

– для систем с приоритетами характерно следующее: узлы с меньшим приоритетом имеют больший номер выигрышного слота при передаче. В случаях, когда высокоприоритетных узлов много, наблюдается ситуация, когда частота появления коллизий в системе выше, чем частота успешной передачи низкоприоритетных сообщений. Для системы 0&2,  $n = 16$ , которая характеризуется меньшей разницей между числом приоритетных и неприоритетных узлов, а также меньшим числом приоритетных узлов, наблюдается примерное равенство слотов успешной/неудачной передачи низкоприоритетных сообщений. Однако в установившемся состоянии системы частота коллизий всё ещё больше частоты успешной передачи низкоприоритетными узлами.

### 2.3. Средняя задержка доступа к каналу

Выполним оценку и анализ среднего времени задержки узла по доступу к каналу  $t_{mean}$  по формуле (8). Из формулы очевидно, что характер изменения времени задержки при изменении отставания канала носит нелинейный характер, что обусловлено изменением среднего времени пакетного цикла  $\tau$ , а также среднего числа попыток  $\xi$  по доступу к каналу. Результат оценки среднего времени доступа к каналу представлен на рис. 3 и в табл. 4.

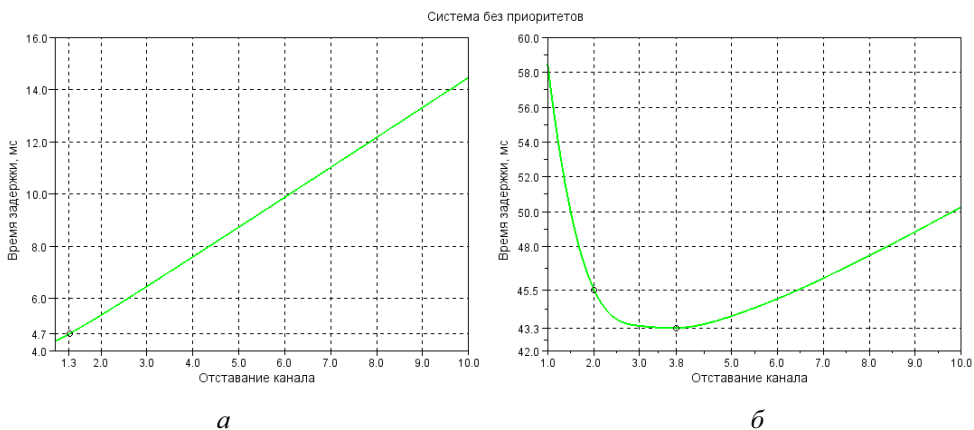


Рис. 3. График зависимости времени задержки от величины отставания канала



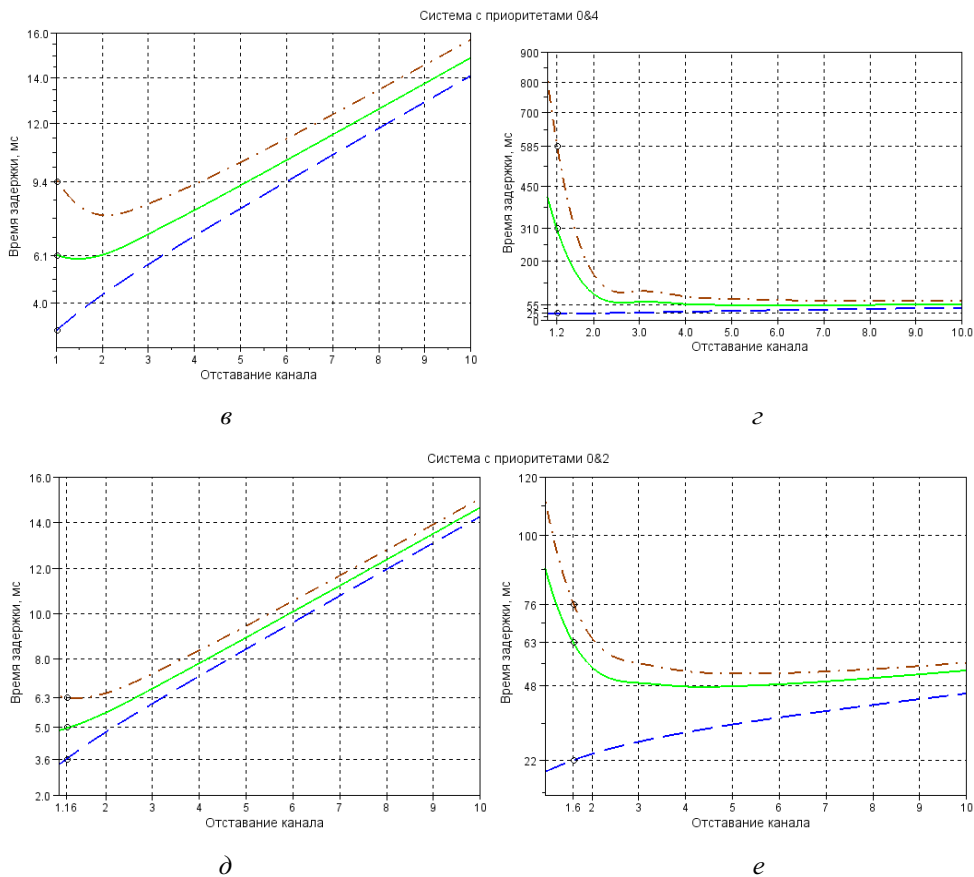


Рис. 3. Окончание

Таблица 4

Результат оценки среднего времени задержки

Наименование	$PrSlots$	$n (n_i)$	$k (BL)$	$T_{mean} (l=0)$ , мс	$T_{mean} (l=l_{max})$ , мс	$T_{mean}$ , мс
Сегмент без приоритетов	0	2	1,30	4,7		
		16	2,00	45,5		
Сегмент с приоритетами	0, 4	2 (1, 1)	1,00	2,9	9,4	6,1
	0, 2		1,16	3,6	6,3	5,0
	0, 4	16 (8, 8)	1,20	25,0	585,0	310,0
	0, 2		1,60	22,0	76,0	63,0

Анализ полученных графиков:

– в системах с маленьким количеством узлов соперников ( $n = 2$ ) наблюдается практически линейный рост времени задержки

с увеличением величины отставания канала. Это соответствует формуле (8), потому что происходит рост величины пакетного цикла, а вероятность успешной передачи узлами сети возрастает незначительно;

– для систем с большой конкуренцией с ростом величины отставания при малых  $BL$  и благодаря резкому снижению вероятности коллизии в системе наблюдается резкое снижение времени доступа к каналу. При больших  $BL$  вероятность коллизии устанавливается практически неизменной и происходит дальнейший рост величины пакетного цикла, что приводит к росту величины задержки;

– в системах с приоритетами узлы с высшим уровнем приоритета характеризуются значительно большими вероятностями успешной передачи, поэтому обладают меньшей задержкой по доступу к каналу в сравнении с низкоприоритетными узлами. Меньшее значение среднего времени задержки узлов в целом по системе наблюдается в системах без приоритетов;

– для систем с большим количеством конкурентов за канал алгоритм доступа не позволяет выбрать оптимальное по производительности значение уровня отставания канала, что проиллюстрировано на рис. 3 для систем с  $n = 16$ . Этот факт связан с тем, что при увеличении загрузки канала отставание канала равномерно изменяет ширину состязательного окна, тем самым выбирая оптимальную ширину только для систем с определённым числом активных узлов, и не может гарантировать оптимального уровня производительности для любого количества узлов-соперников в сети. Введение в протокол динамически изменяемого параметра ширины базового СО, а также изменение алгоритма подсчёта отставаний в сети не решат проблему выбора оптимального размера состязательного окна для всех типов нагрузок в сети.

#### **2.4. Анализ полученных результатов**

На основе выполненного анализа производительности можно сделать следующие выводы о целесообразности использования механизма приоритизации в сегментах Lon-сетей.

Использование приоритетов в *LonWorks* приводит к значительному преимуществу во времени доступа приоритетных узлов, но при этом низкоприоритетные узлы характеризуются значительно большими задержками в системе. Кроме этого, использование приоритетов

в системе приводит к меньшему уровню вероятности коллизии в системе, однако, как показано на рис. 2, в системе с большим количеством приоритетных узлов и значительной разницей в уровнях приоритета частота успешных передач низкоприоритетными узлами гораздо ниже частоты коллизии. По этой причине принцип наделения узлов приоритетами в сети должен следовать строгим правилам, основными из которых являются: 1) суммарная интенсивность формирования приоритетных сообщений в сети должна быть гораздо ниже интенсивности низкоприоритетных сообщений; 2) высшая степень приоритета должна назначаться узлам сети с низшей интенсивностью формирования сообщений. Руководствуясь представленными рекомендациями, становится возможным повышение уровня производительности по передаче сообщений высокоприоритетными узлами сети практически без потери производительности низкоприоритетных узлов.

### **Заключение**

В статье решена задача оценки производительности Lon-сети, содержащей узлы с различными уровнями приоритетов, в основу которой положен анализ прогнозирующего р-CSMA протокола. Представлены основные аналитические соотношения для определения характеристик производительности р-CSMA. Выполнена оценка следующих параметров производительности и построены соответствующие графики: отставание канала, вероятность успешной/неудачной передачи, средняя задержка доступа к каналу. Выполнен анализ полученных результатов и сделаны выводы о целесообразности применения приоритетов в Lon-сети.

### **Библиографический список**

1. Тирш Ф. Введение в технологию LonWorks. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. LonTalk protocol specification, ANSI/CEA-709.1-B. United States: ISO/IEC JTC 1 SC 25, 2006.
3. Miśkiewicz Marek. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA // Sensors. – Kraków, Poland: MDPI, 2007.
4. Moshe Kam. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. – Edmonton, Canada: IEEE, 2005.

Получено 05.09.2012