

4. Алакоз Г. М., Добротворский А. С. Бит-потокное ассоциативное суммирование с разделяемой пространственно-временной реакцией // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 4. С. 3–15.

5. Sorter-Based Arithmetic Circuits for Sigma-Delta Domain Signal Processing. Part II: Multiplication and Algebraic Functions / H. Fujisaka, M. Sakamoto, C.-J. Ahn, T. Kamio, K. Haeiwa // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 2012. Vol. 59, № 9. P. 1966–1979.

6. Al-Makhles D., Patel N., Swain A. Bit-stream control system: Stability and experimental application // Intern. Conf. on Applied Electronics (AE). Pilsen, Czech Republic: IEEE, 2013. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6636470>.

7. Дробот П. Н., Дробот Д. А. Осцилляторные сенсоры с частотным выходом // Южно-Сибирский

науч. вестн. 2012. № 1. С. 120–123. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000450442>.

8. Assurance of Fault-Tolerance in Bit-Stream Computing Converters / A. I. Gulin, N. M. Safyannikov, O. I. Bureneva, A. Yu. Kaydanovich // Proc. of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, 2018. P. 418–421.

9. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018660969. Программа бит-потокного устройства для извлечения квадратного корня / О. И. Буренева, О. А. Жирнова; заявл. 09.08.2018; зарег. 30.08.2018, опубл. 30.08.2018; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

O. I. Bureneva, O. A. Zhirnova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

BIT-STREAM DEVICE FOR COMPUTATION OF SQUARE ROOTS

The traditional way of processing information received from the sensitive elements with frequency output is direct calculations. This way supposes the conversion of frequency signals into digital form and performing of the necessary mathematical operations. In the article an alternative solution based on the usage of fault-tolerant tracking structures is offered. Such devices perform bit-stream data processing as the each bit element is received. In this case, operations of varying complexity can be reduced to the basis of the increment/decrement operation and operations associated with the change of the data form. With the use of the proposed approach, a device for extracting a square root has been developed. In this article a diagram of the device and the order of its operation are presented. The result of model experiments with the use of VHDL description of this device and CAD Quartus II are shown.

Bit-stream conversions, structural organization of calculations, inverse function, basic elements, process integration, fault tolerance

УДК 622.276.001

С. А. Даденков, Е. Л. Кон
Пермский национальный политехнический университет

Модель информационно-управляющей сети с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p-persistent CSMA

Разрабатывается модель информационно-управляющей сети с алгоритмом случайного множественного доступа с контролем несущей и прогнозированием сетевой нагрузки predictive p-persistent CSMA и способ оценки вероятностных и временных характеристик передачи информации. Объектом исследования является процесс информационного обмена в fieldbus-сетях LonWorks, BacNet с анализируемым алгоритмом. Цель исследования – повышение точности количественных оценок характеристик времени и надежности доставки информационных сообщений. Выполнен аналитический обзор научных публикаций, посвященных анализу характеристик сетей с алгоритмами случайного доступа, что позволило выявить используемые методы решения, а также степень проработанности проблемы. Использование полученной информации позволило выделить проблему учета в моделях ряда значимых параметров функционирования, а также выбрать эффективный математический аппарат для ее решения. В результате созданы модель сети с алгоритмом predictive p-persistent CSMA и способ оценки характеристик передачи информации, преимущественно отличающиеся от аналогов корректным учетом спорадической и разнородной по сервисам доставки сетевой нагрузки узлов.

Модель сети, случайный множественный доступ, вероятностные и временные характеристики, передача информации, промышленная сеть, полевая шина, сенсорная сеть, LonWorks, fieldbus, predictive p-persistent CSMA

Алгоритмы случайного множественного доступа с контролем несущей широко распространены

и применяются в сетях с разделяемой (общей) средой передачи данных. В настоящее время слу-

чайный доступ к каналу успешно применяется в проводных промышленных, сенсорных (Fieldbus) и беспроводных децентрализованных самоорганизующихся сетях связи (MANET). Преимуществом случайного доступа над детерминированным является возможность обеспечения меньших временных задержек доступа и передачи данных по сети. Это возможно за счет организации передачи информации только в необходимые моменты времени, а не распланированные заранее принятым «расписанием». Известно, что использование случайного доступа эффективно при значении коэффициента использования пропускной способности каналов связи менее 0.5 [1], [2]. В иных случаях методы детерминированного доступа имеют преимущественное применение за счет гарантированности интервалов доставки данных и высокой предсказуемости максимальной длительности задержки доступа и передачи.

Существует большое количество различных алгоритмов случайного множественного доступа с контролем несущей, предотвращением и избеганием коллизий. В fieldbus-сетях нашли применение: CSMA/NBA (промышленные шины CAN, KNX/EIB, DeviceNet), 1-CSMA/CD (EtherNet/IP, ModBus/TCP), predictive p -persistent CSMA (BacNet, LonWorks). Алгоритмы отличаются эффективностью (времени и надежности передачи) обеспечения информационного обмена в сети при различных загруженности каналов сети, количестве узлов, периодичности/спорадичности сетевой нагрузки и других параметрах. Передаваемый в анализируемых сетях трафик имеет «взрывной» спорадический характер. Это актуализирует исследование и применение алгоритмов, самоадаптирующихся к изменяющемуся уровню загрузки сетевого канала, в частности, алгоритма с прогнозированием нагрузки predictive p -persistent CSMA.

Объектом исследования является процесс доступа узла к каналу связи и передачи сообщения в сети с алгоритмом случайного множественного доступа и избеганием коллизий predictive p -persistent CSMA. Предметом исследования являются способы количественной оценки вероятностных и временных характеристик, надежности передачи информации в сетях со случайным доступом. Цель исследования заключается в повышении точности количественных оценок вероятностных и временных характеристик информационного обмена в сетях с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA посредством корректного учета ранее не анализируемых в совокупности сетевых параметров.

Литературный обзор. Широкое применение для анализа сетей с различными алгоритмами случайного доступа нашли классические системы массового обслуживания с повторными вызовами (в результате потери или отсутствия ответа), приоритетами, исследуемые в работах известных российских ученых А. А. Назарова, И. И. Хомичкова, С. Н. Степанова и др. Результаты указанных работ могут применяться для оценки вероятностных и временных характеристик преимущественно сетей с 1-настойчивым алгоритмом случайного множественного доступа CSMA/CD, используемым в сетях Industrial Ethernet, ModbusTCP, EtherNet/IP, HSE, ProfiNet, Interbus-TCP/IP и др. Аналитическое и имитационное моделирование алгоритма случайного доступа CSMA/NBA в сети EIB\KNX выполнено в [3]. Анализ характеристик CAN-шины с алгоритмом доступа CSMA/NBA посвящены работы [4]–[9]. В [10]–[13] анализируются сенсорные сети LonWorks, BacNet, использующие алгоритм с динамическим уровнем настойчивости predictive p -persistent CSMA.

Оценке характеристик анализируемого алгоритма predictive p -persistent CSMA посвящено большое количество публикаций, среди которых можно выделить основные работы авторов Moshe Kam [10], Marek Miśkiewicz [11], [12], Peter Buchholz и Jorn Plonnigs [13]. Представленные модели учитывают преимущественно протокольные особенности только канального и физического уровней модели OSI и не учитывают значимые особенности функционирования вышележащих сетевого и транспортного уровней стека протоколов. Исследование в [10]–[12] производится в режиме насыщения (полной загруженности) канала передачи данных, в котором основным фактором, влияющим на вероятностные и временные характеристики сети, является постоянное число активных узлов (и сообщений), соперничающих за канал передачи согласно модифицированному алгоритму predictive p -persistent CSMA. Исследование системы в данном режиме обусловлено простотой решения задачи количественной оценки характеристик передачи за счет отказа от учета динамически изменяемых сетевых и протокольных параметров модели, в том числе изменяющегося с течением времени числа узлов-соперников и принадлежащих им сообщений. Модели с данным ограничением могут быть использованы для оценки верхнего уровня задержки, без учета возникающих на узлах очередей сообщений, но не

могут использоваться для точной оценки характеристик сети в нормальном режиме эксплуатации. Основу построения указанных аналитических моделей составляет аппарат дискретных цепей Маркова, а вероятности переходов между состояниями модели и оценка характеристик модели рассчитываются с помощью аппарата теории вероятностей.

В [10] предложена наиболее простая модель функционирования исследуемого алгоритма и способ оценки вносимой им задержки передачи через оценку среднего количества временных слотов доступа узла к каналу. Результаты оценки могут быть отнесены к оценкам, выполняемым для сервиса доставки информации без подтверждения, что обусловлено принципом изменения прогнозируемой нагрузки идентично данному сервису.

В [11] предложено развитие модели [10] функционирования алгоритма с учетом особенностей сервисов передачи транспортного уровня и видов адресации сетевого уровня OSI при передаче сообщений различных типов. В частности, предложены способы учета в модели однородных сервисов доставки: «без подтверждения», «с подтверждением», «запрос-ответ» и видов адресации – «одноадресная» и «многоадресная», учитывается их влияние на протокольные параметры модели, в том числе прогнозируемую нагрузку на канал в случае передачи определенного типа сообщения. Недостаточно проработаны вопросы учета принципов доставки информации: особенностей сервиса доставки «повторяемая передача без подтверждения» и типов передаваемых сообщений – напоминаний (Reminder), повторяемых сообщений (Repeated simple); числа одновременно возможных исходящих транзакций (ограничено режимом насыщения, т. е. наличием у узла всегда только одного сообщения для передачи); таймеров и счетчиков передачи/приема и других значимых факторов функционирования.

Модель [12] является развитием [11], в рамках которой предложен способ учета неоднородности информационной нагрузки по сервисам доставки и видам адресации, передаваемой по каналам сети, что повышает корректность модели и результатов оценки.

В [13] выполнен переход к более адекватной модели алгоритма доступа узлов к сети, учитывающей случайный характер нагрузки на канал передачи данных, заданный экспоненциальным распределением. Авторы проанализировали канал передачи декомпозицией его на составляющие –

узлы, которые представляются элементами системы массового обслуживания и являются источниками информации, а канал передачи является обслуживающим устройством. На основе математической модели и предложенных аналитических соотношений [12] авторы дополнительно предложили способы учета следующих протокольных особенностей: опции обнаружения коллизии, ограничение размера буфера узла, разнородные размеры информационных сообщений. Использование в модели [13] указанных наработок в режиме насыщения канала связи свидетельствует о нарушении корректности алгоритма доступа для различных сервисов и видов адресации.

Аналитический обзор публикаций выявил проблему корректности существующих моделей и количественных оценок их вероятностных и временных характеристик. Проблема заключается в низкой детализации моделей значимыми протокольными параметрами и особенностями функционирования: ограничение соперничества узла за канал на время получения всех предусмотренных в типе транзакции ответных (подтверждающих) сообщений; ограничение на время ожидания подтверждения (таймеры передачи); ограничение на количество повторных попыток передач для различных типов сообщений; зависимость числа узлов-соперников в модели от их индивидуальных интенсивностей и с учетом типа информационных сообщений; разнородность используемых в каналах сети сервисов доставки и видов адресации; приоритеты доступа узлов-соперников за канал и др. Это определяет важность круга поставленных и решаемых в работе задач разработки и анализа новой корректной аналитической модели и способов количественной оценки вероятностных и временных характеристик сети с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA.

Разработка модели. Алгоритм случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA является алгоритмом с переменным (псевдопостоянным) уровнем настойчивости p узлов сети за доступ к каналу. Уровень настойчивости узлов при передаче варьируется в диапазоне [0.0625...0.000976] с изменением прогнозируемой нагрузки на канал. Регулировка настойчивости позволяет снизить вероятность коллизии при возрастании нагрузки на канал сети и уменьшить время доступа при снижении загрузки канала.

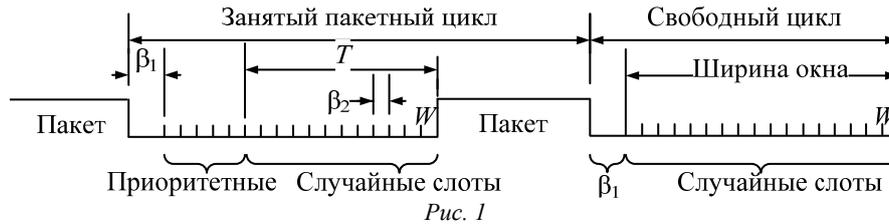


Рис. 1

Передача данных в сети осуществляется в синхронных пакетных циклах (рис. 1) [2], содержащих: 1) минимальный межпакетный интервал времени β_1 установления отсутствия активности в канале связи; 2) приоритетный интервал, равный числу приоритетных тайм-слотов доступа продолжительностью β_2 каждый; 3) случайный интервал доступа T , равный случайному количеству слотов доступа продолжительностью β_2 , выбираемых по равномерному закону из диапазона $[0 \dots W - 1]$, где ширина соревновательного окна $W = W_{base}BL$, базовая ширина соревновательного окна $W_{base} = 16$ [2], прогнозируемая на канал нагрузка (backlog) $BL = [1 \dots 64]$ регулирует уровень настойчивости узлов канала $p = 1/W$; 4) задержку передачи пакета, равную продолжительности передачи PL бит данных по каналу с пропускной способностью C . Выбор узлами равного числа слотов доступа и одновременная передача приводят к возникновению коллизии, что требует повторной передачи данных. Необходимость предотвращения коллизии в следующий пакетный цикл требует повышения на 1 прогнозируемой нагрузки [2]. Успешный или свободный пакетный цикл завершается снижением узлами прогнозируемой нагрузки на канал на единицу для сокращения времени доступа.

Значимое влияние на характеристики передачи оказывают сервисы доставки, виды адресации и типы передаваемых сообщений. Влияние связа-

но с различным изменением параметров сети [2]: прогнозируемой нагрузки (backlog, b), числа сообщений (message, m) в сети, числа активных узлов-соперников (node, n) за канал. В табл. 1 систематизированы параметры и влияние типов передаваемых сообщений на сетевые параметры (n, m, b) при успешной и неудачной передачах. Используется общепринятое обозначение сервисов доставки [2]: сервис передачи с подтверждением (Acknowledged, ACKD/ACK, ACKD – сообщение, требующее подтверждения ACK); без подтверждения (Unacknowledged, UACKD); без подтверждения с повторением (Unacknowledged_Repeated, UACKD_RPT, RPT – исходное сообщение, RPT_S – повторяемое сообщение); напоминания (Reminder/Message, REM – напоминание, REM_MES – напоминание и сообщение); сервис запрос/ответ (Request/Response, REQ/RES, REQ – запрос, RES – ответ). Виды адресации сообщений: одноадресная (unicast), многоадресная (multicast), широковещательная (broadcast). Для каждого типа сообщения используются индивидуальные счетчики: счетчик максимального числа повторных передач (Retry count), таймер допустимого времени передачи (ожидания ответа) (Transmit timer), таймер приема (распознавания дубликатов) (Receive timer) и минимальный интервал задержки передачи повторяемых сообщений (Repeat timer).

Представить работу модели алгоритма доступа и передачи можно в терминах систем массового обслуживания. Устройством обслуживания в

Таблица 1

Сервис доставки	Виды адресации	Типы сообщений	Успешная передача			Неудачная передача			Повтор передачи	Таймер	
			n	m	b	n	m	b			
ACKD/ACK REQ/RES	Unicast	ACKD, REQ	0			0			[2...5]	Transmit Receive	
	Unicast, multicast	ACK, RES	-1			-1			0		
		Multicast	ACKD, REQ	ack - 1			0				[2...5]
			REM								0
	REM_MES	0									
Broadcast	REQ	dmn - 1	15		-1			[2...5]			
	RES										
UACKD	Unicast, multicast	UACKD	-1			-1			0	Receive	
UACKD_RPT	Unicast, multicast	UACKD_RPT	0	rpt - 1	0			0	Receive Repeat		
		UACKD_RPT_S	0(-1)	-1	0(-1)	-1					

модели является полудуплексный канал сети, осуществляющий обработку информационных пакетов с задержкой, равной длине пакетного цикла τ . Для простоты анализа целесообразно принять начальное ограничение модели на однородность параметров информационной нагрузки: приоритеты, размеры информационных пакетов, виды адресации и сервисы доставки, интенсивности λ нагрузки узлов и др. Информационная нагрузка, формируемая всеми узлами, передающими по каналу, является суммой интенсивностей λ_i (пакетов в секунду), создаваемых каждым узлом i в отдельности:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i = n\lambda_i.$$

Загрузка канала передачи ρ определяется отношением интенсивности нагрузки λ_{Σ} к интенсивности потока обслуживания $\mu = 1/\tau$. Поскольку в сети используются сервисы с повторной передачей сообщений, то реальная нагрузка канала может отличаться от аналитической, что требует учета в модели.

Анализируемая система обслуживания является открытой (разомкнутой), т. е. узлы формируют пакеты независимо от состояния канала, так что вероятность формирования i пакетов узлами в канале в течение любого интервала времени T описывается законом Пуассона:

$$p_i = \frac{(\lambda_{\Sigma}T)^i}{i!} e^{-\lambda_{\Sigma}T}.$$

За интервал времени T следует принимать размер пакетного цикла τ , среднее значение которого можно определить исходя из предположения нахождения сети в режиме насыщения [12]. Ввиду предположения о равенстве нагрузок λ , создаваемых каждым узлом в отдельности, логично полагать и равномерность распределения сообщений системы m среди всех $n = N$ узлов канала. Таким образом, количество узлов-соперников n за канал передачи изменяется пропорционально количеству информационных сообщений m , т. е. $n = m$ при $n \leq m$ и $n = N$ в случае $m > n$.

Вероятностный процесс генерации и обслуживания сообщений в сети можно описать с помощью аппарата дискретных цепей Маркова. Состояния модели должны характеризоваться основными выделенными параметрами (n, m, b) , влияющими на характеристики доступа и передачи (рис. 2). Различные совокупности параметров

(n, m, b) определяют наборы индивидуальных характеристик каждого состояния модели: время пакетного цикла передачи τ , вероятность успешной передачи p_y и коллизии p_k , количество E попыток передачи до успешной, время доставки T_d сообщения, вероятность p_i формирования i сообщений за время пакетного цикла. Оценка данных параметров каждого состояния модели необходима для количественного расчета модели и может быть выполнена по соотношениям, предложенным в [14]. Переходы между состояниями модели необходимо связывать с вероятностями событий: вероятностями успешной и неудачной передач, вероятностью формирования i сообщений за дискретное время пакетного цикла. Указанные вероятности образуют совместные события в дискретные моменты состояния модели (моменты завершения пакетных циклов передачи) и определенным образом влияют на изменение параметров состояний.

Корректное составление графа состояний и переходов модели требует учета основных принципов передачи сообщений. Передача простого сообщения без возможности его повторной отправки и подтверждения характеризуется положениями: успешная передача завершается сокращением числа сообщений m и узлов-соперников n на канал на 1 ($m \leq N$); коллизия (при $n \geq 2$) завершается удалением всех попавших в нее сообщений ≥ 2 ($m - 2$). Изменение параметров состояния модели зависит и от принципа обнаружения коллизии: 1) узлы не обнаруживают коллизию; 2) узлы гарантированно обнаруживают коллизию. Изменение параметров состояния при успешной передаче инвариантно к обнаружению коллизии: ($n \leq m, m - 1 + i, b - 1$) и характеризуется уменьшением числа сообщений на 1 и увеличением на i сгенерированных узлами сети за время доступа и передачи τ , уменьшением прогнозируемой нагрузки на 1.

Результат изменения параметров при коллизии, когда узлы не обнаруживают столкновение, идентичен результату успешной передачи, но отличается тем, что в модели уменьшается количество сообщений на количество узлов (≥ 2), участвующих в коллизии ($n \leq m, m - 2 + i, b - 1$). Вариант с обнаружением отличается увеличением прогнозируемой на канал нагрузки ($n \leq m, m - 2 + i, b + 1$). Влияние всевозможных исходов событий завершения пакетного цикла на параметры (n, m, b) состояния модели представлено в виде элементарного графа на рис. 2.

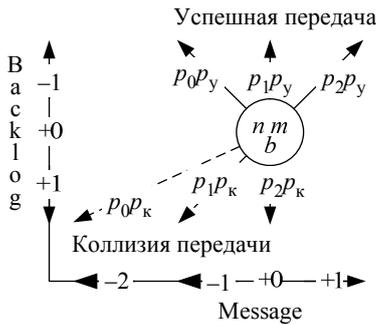


Рис. 2

Приведенное математическое описание позволяет построить дискретную цепь Маркова модели сети (рис. 3). Пространство состояний модели разделено на несколько частей, для каждой из которых характерны следующие особенности: 1) состояния модели с числом узлов-соперников за канал $n < 2$ характеризуются отсутствием событий неудачных передач; 2) состояния с $n = m$ (при $m \leq N$) характеризуются отсутствием очереди сообщений (одно сообщение на узел); 3) состояния с $n = N$ (при $m > N$) (рис. 3, пунктир) характеризуются наличием очереди сообщений в узле(ах), при которой каждый узел имеет одно сообщение и дополнительно каждый из $(m - N) \leq N$ узлов имеет минимум одно сообщение в очереди передачи.

Дискретная цепь отвечает требованиям неприводимости и апериодичности, и поскольку все состояния модели возвратные ненулевые, то для нее существует стационарное распределение вероятностей [15]. Количественный расчет стационарных вероятностей состояний возможен при условии, что цепь обладает свойством конечности. Прогнозируемая нагрузка и число сообщений на канал имеют протокольные ограничения $B = 64$ и $N = 128$. Верхнюю границу M числа сообщений в канале сети можно задать равной произведению числа уз-

лов в сети и вместимости буфера сообщений узла, т. е. $M = Nq$. Таким образом, размерность (число состояний) A модели:

$$A = MB = NqB.$$

Рассчитать стационарные вероятности модели можно составив и решив систему A линейных алгебраических уравнений [15]. Дальнейшая суперпозиция параметров состояний модели с учетом рассчитанных стационарных вероятностей позволяет определить анализируемые характеристики канала сети: вероятности коллизии, успешной доставки и потери данных, распределение и средние времена задержки доступа и передачи.

Моделирование различных сервисов доставки требует анализа передачи сообщений различных типов (табл. 2) и создания свойственных им графов модели. Ранее, при моделировании сервиса без подтверждения (рис. 2), при коллизии принималось удаление из системы двух «столкнувшихся» сообщений. Однако целью выполняемого анализа является моделирование сети с неоднородностью по сервисам доставки. Таким образом, допуская неоднородность трафика и соответственно возможность участия в коллизии сообщений различных типов, необходим пересмотр графа сервиса доставки без подтверждения. Наиболее вероятным, с учетом возможных типов сообщений, является потеря одного сообщения при коллизии (рис. 4). Данное допущение значительно не повлияет на малую и среднюю загрузку канала, а будет значимо только при большой загрузке, анализ которой на практике не представляет интереса.

Анализ сложных сервисов доставки с передачей сообщений более одного типа (в составе одного сервиса доставки) требует анализа пропор-

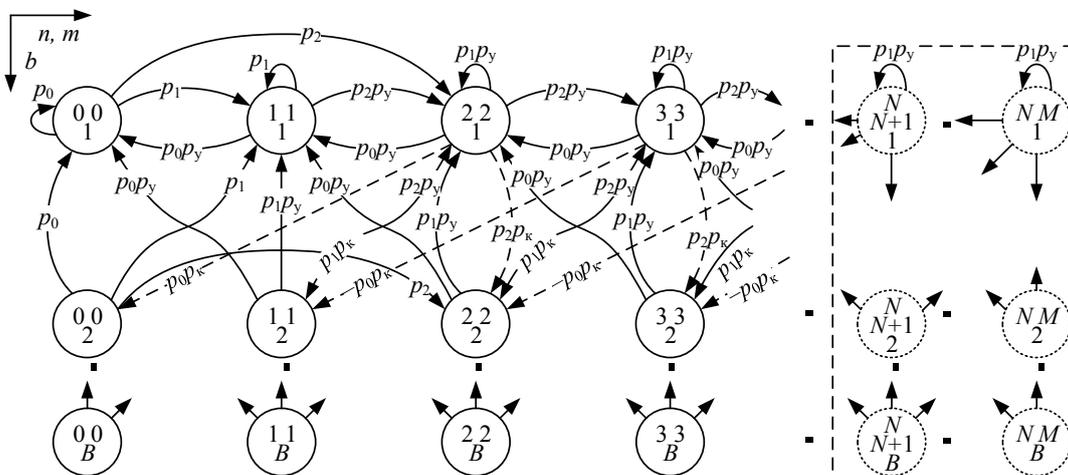


Рис. 3

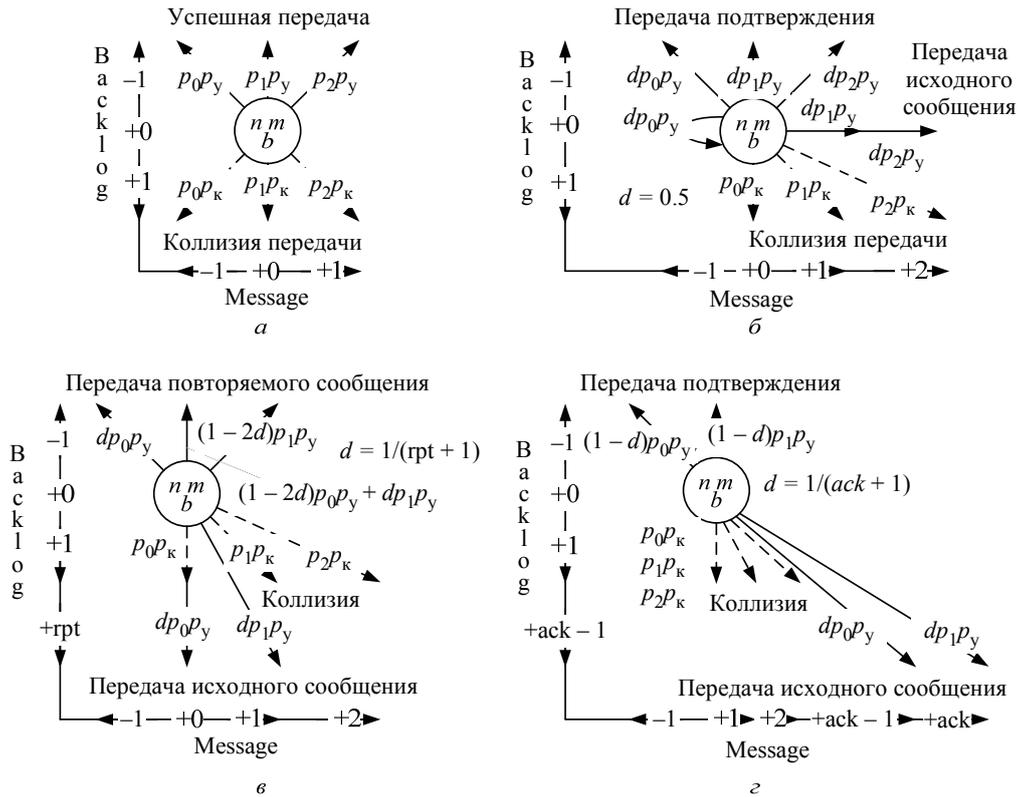


Рис. 4

циональности их числа в рамках состояния модели с m сообщениями. Пропорциональность для каждого сервиса и вида адресации может быть задана с помощью долей d сообщений различных типов в состоянии модели (рис. 4).

Доли сообщений различных сервисов доставки:

1. Одноадресная/многоадресная передача без подтверждений (UACKD) (рис. 4, а). Все сообщения являются исходными неподтверждаемыми ($d = 1$).

2. Одноадресная передача с подтверждением или ответом (ACKD/ACK, REQ/RES) (рис. 4, б). На каждое исходное сообщение существует ответное, поэтому справедливо равенство числа в системе сообщений типов ACKD, REQ ($d = 0.5$) и подтверждений (ответов) ACK, RES ($d = 0.5$). Количество сообщений при коллизии не изменяется, т. е. принято неограниченное количество повторных передач, что повлияет только на результаты моделирования при большой загруженности канала.

3. Одноадресная/многоадресная передача повторяемых сообщений без подтверждений (UACKD_RPT) (рис. 4, в). На исходное сообщение предполагается rpt повторяемых сообщений, доля исходных $d = 1/(rpt + 1)$, повторяемых $d = (rpt/(rpt + 1))$.

4. Многоадресная передача с подтверждением (mACKD) или сервисом запрос/ответ (mREQ/RES). На каждое исходное сообщение существует ack ответов, доля исходных сообщений $d = 1/(ack + 1)$, ответных $d = (ack/(ack + 1))$ (предполагаемое количество подтверждений ack равно числу узлов в группе $grp - 1$) (рис. 4, г).

Таким образом, моделирование обслуживания каналом определенных типов сообщений должно выполняться по составленным графам (рис. 4), учитывающим в ветвях переходов состояний коэффициенты d при вероятностях успешной и неудачной передач сообщений.

Созданные графы позволяют строить модели сети с различными, но однородными по составу сервисами доставки сообщений. Учесть неоднородность сервисов доставки и видов адресации можно суперпозицией полученных элементарных графов модели (рис. 4) с учетом долей их присутствия в сетевом трафике канала связи. Долю q_k трафика определенного k типа сервиса доставки и адресации можно определить следующим образом. В составе суммарной исходной интенсивности λ_Σ нагрузки сообщений на канал сети необходимо выделить индивидуальные составляющие интенсивности λ_k каждого сервиса доставки. Тогда доля интенсивности информационного трафика с сервисом k может быть определена отношением

$$q_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_\Sigma}.$$

Таким образом, неоднородность сервисов доставки и видов адресации в модели можно учесть суперпозицией элементарных графов сервисов доставки (рис. 4) с учетом полученных долей трафика различных сервисов как множителей (вероятности передачи в пакетном цикле сообщения определенного сервиса) при связях элементарных графов.

Количественная оценка характеристик модели основана на определении стационарных вероятностей состояний модели и оценке вероятностно-временных характеристик коммуникационных взаимодействий узлов в распределенной системе по полученным соотношениям. Стационарные вероятности π состояний модели дискретной цепи Маркова (рис. 4) с известной матрицей P вероятностей переходов определяются из решения системы A линейных алгебраических уравнений [15]:

$$\pi = \pi P = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_A] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdot & P_{1A} \\ P_{21} & P_{22} & \cdot & P_{2A} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{A1} & P_{A2} & \cdot & P_{AA} \end{bmatrix}.$$

В результате определяются стационарные вероятности π нахождения системы в каждом состоянии (n, m, b) модели. Оценка средних значений u вероятностно-временных характеристик коммуникационных взаимодействий узлов в сети выполняется с использованием матрицы U характеристик сети в каждом состоянии модели [14] по соотношению

$$u = \sum_{i=1}^A \pi_i U_i. \quad (1)$$

По выражению (1) необходимо оценить среднее количество $n_{\text{ср}}$ активных узлов в канале передачи, среднее количество $m_{\text{ср}}$ сообщений для передачи, среднюю продолжительность пакетного цикла $\tau_{\text{ср}}$ и время доставки сообщения $T_{\text{д}}$, вероятность коллизии $p_{\text{к}}$ и успешной передачи $p_{\text{у}}$.

Расчет времени доставки сообщения $T_{\text{д.с}}$ должен выполняться индивидуально для каждого узла, в зависимости от его приоритета, используемого в транзакции сервиса доставки, а также размеров очередей узлов отправителя и получателя. Это требует поправки выражения расчета

времени $T_{\text{д}}$ доставки сообщения в состоянии модели. Время доставки сообщения в состоянии модели зависит от среднего размера r очереди узла-источника и поэтому равно произведению среднего времени доставки $T_{\text{д}}$ и длины очереди:

$$T_{\text{д.с}} = T_{\text{д}}(1+r). \quad (2)$$

В состоянии (n, m, b) модели в очередях всех узлов канала расположено $(m-n)$ сообщений. С учетом равенства интенсивностей узлов сообщения, стоящие в очереди, равномерно распределены по очередям n узлов. Таким образом, средний размер очереди узла

$$r = \frac{m-n}{n}.$$

Время доставки зависит от сервиса передачи и вида адресации. Для сервиса «без подтверждения» время $T_{\text{д.с}}$ определяется по выражению (2). Это справедливо в случае успешной передачи, т. е. с вероятностью, обратной вероятности потери сообщения $(1-p_{\text{п}})$ (для сервиса «без подтверждения» $p_{\text{п}} = p_{\text{к}}$). Для сервиса «с подтверждением» указанное значение времени $T_{\text{д}}$ справедливо с аналогичной вероятностью $(1-p_{\text{п}})$. При этом вероятность потери сообщения с повторными передачами ниже при гарантированном обнаружении коллизии. В случае отсутствия опции обнаружения узел, отправивший сообщение за время $T_{\text{д}}$, с вероятностью неуспешной доставки $p_{\text{ну}} = 1-p_{\text{у}}$ ожидает ответа в течение таймера передачи t . Таким образом, успешной доставке сообщения предшествует время ожидания определенного числа повторных передач в течение таймера передачи. Тогда среднее время доставки сообщения

$$T_{\text{д.с}} = \sum_{e=0}^k (T_{\text{д}} + et)(1-p_{\text{ну}})^e p_{\text{ну}}, \quad (3)$$

где e – номер попытки успешной передачи; k – допустимое количество повторных передач.

Полная вероятность $p_{\text{п}}$ потери исходного сообщения «с подтверждением» при передаче через один или несколько каналов распределенной системы определяется возможным количеством k неуспешных доставок сообщения:

$$p_{\text{п}} = p_{\text{ну}}^{k+1}. \quad (4)$$

Время доставки сообщения с сервисом «повторяемая передача без подтверждения» определяется временем числа последовательных попыток передач e до успешной с максимальным числом попыток передачи k , равным числу повторяемых передач grt , при условии, что каждая передача может завершиться коллизией. Тогда выражение для определения времени доставки (3) справедливо и для данного сервиса, независимо от опции обнаружения коллизии, с t – таймером повторяемой передачи (если таймер меньше времени доступа, то $t = T_{д.с}$). Вероятность потери (неудачная доставка) информационного сообщения определяется по (4).

При оценке среднего времени доставки сообщения с сервисом «запрос/ответ» необходимо учитывать последовательность передач сообщений в рамках транзакции. При этом задержка доставки складывается из времен $T_{дi}$ и $T_{дj}$ доставки исходного и ответного сообщений узлами i, j . При оценке следует учитывать следующее: сообщения формируются и передаются узлами с различными уровнями приоритетов; узлы, формирующие исходное и ответное сообщения, имеют различную длину q очереди передачи; размер очереди узла ответчика $q = 0$, что обусловлено приоритетом передачи ответных сообщений; с вероятностью коллизии p_k сообщение-ответ может быть потеряно, результатом является повторная передача исходного сообщения, выполняемая через интервал времени ожидания t таймера передачи. Тогда время доставки можно определить по выражению (3) с учетом того, что $T_{д} = T_{дi} + T_{дj}$. При этом вероятность неудачной доставки сообщения за одну попытку передачи в выражении зависит от возможности узла обнаруживать коллизию передачи. С опцией обнаружения коллизии сообщение может быть не доставлено только по причине коллизии сообщения-ответа, и поэтому вероятность неудачной передачи $p_{ну}$ равна вероятности коллизии. Без опции обнаружения коллизии вероятность неудачной доставки вычисляется как вероятность коллизии хотя бы в одной передаче в канале: $2(1 - p_k)p_k + p_k^2$. Вероятность потери сообщения с сервисом «запрос/ответ» следует рассчитывать по выражению (4).

Расчет времени доставки сообщения узлами из разных каналов связи должен учитывать особенности передачи через несколько промежуточ-

ных каналов. Далее рассматривается случай с обнаружением коллизии. Сложность расчета обусловлена следующими факторами: возможностью потери сообщения при передаче не в одном канале, а в нескольких; возможностями коммуникационных узлов по осуществлению повторных передач в случае коллизии в каждом из каналов. Примем, что транзитные коммуникационные узлы сети не осуществляют повторную передачу сообщения в случае коллизии. Тогда вероятность неудачной доставки сообщения за одну попытку равна сумме вероятностей потери сообщений в каждом последующем канале при условии, что во всех предыдущих каналах потери не было:

$$P_{ну} = \sum_{i=1}^r P_{ki} \prod_{o=1}^{i-1} (1 - P_{ko}),$$

где r – количество каналов передачи сообщения на пути от источника к получателю. Для сервиса «запрос/ответ» вероятность неудачной доставки определяется с учетом вероятностей недоставки по полной цепочке транзакции (в обе «стороны»). С учетом этого, а также того, что время доставки в распределенной системе $T_{д}$ представляет сумму времен доставки сообщения в каждом канале различными узлами, время доставки может быть рассчитано по выражению (3). Общая вероятность потери определяется по выражению (4).

Для решения задачи количественной оценки характеристик модели алгоритма передачи, ввиду свойственных ей большой размерности и высокой вычислительной сложности, разработана программная реализация построения и расчета характеристик аналитической модели в системе инженерных и научных расчетов MathCad.

Моделирование и анализ результатов. Выполняется оценка основных характеристик передачи данных ($\rho, T_{д.с}, p_y, p_k, p_n$) в сети с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA и неоднородными сервисами доставки. Моделирование выполняется для следующих исходных данных: пропускная способность C канала сети 78.125 кбит/с, средний размер сетевого сообщения Pkt 96 бит, средняя интенсивность (число сообщений в секунду) обслуживания каналом, протокольные параметры для среды передачи TP/FT-10 $\beta_1 = 0.868$ мс, $\beta_2 = 0.168$ мс, количество узлов в сети $N = 20$, количество попыток передач $k = 3$, интервал времени передачи $t = 20$ мс, доли сервисов передачи со-

общений $d_{UACKD} = 0.4$, $d_{ACKD} = 0.4$, $d_{REQ} = 0.2$. Проводится 4 сценария моделирования (табл. 2), отличающихся суммарной интенсивностью информационной нагрузки λ_{Σ} узлов на канал сети.

Таблица 2

№ сценария	λ_{Σ} , сообщ./с
1	25
2	50
3	100
4	150

Результаты оценки вероятностных и временных характеристик передачи данных в сети с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA сведены в табл. 3. Временные значения в таблице приведены в миллисекундах.

кольных характеристик каналов связи. Это актуализирует использование предложенного аналитического инструментария для проектирования сетей с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent CSMA и способствует решению задачи выбора допустимого состава узлов в каналах связи и используемых ими сервисов доставки сообщений для обеспечения требуемых характеристик быстродействия и надежности передачи информации.

В статье приведена аналитическая модель и предложен способ количественной оценки вероятностных и временных характеристик передачи информации в сети с алгоритмом случайного множественного доступа predictive p -persistent

Таблица 3

№	ρ	P_y	P_k	$P_{п_UACKD}$	$P_{п_ACKD\&REQ}$	$T_{д.с} UACKD$	$T_{д.с} ACKD/ACK$	$T_{д.с} REQ/RES$
1	0.16	0.9991	0.0009	0.0009	$4.1 \cdot 10^{-6}$	4.14	4.14	8.28
2	0.31	0.9960	0.0040	0.0040	$1.9 \cdot 10^{-5}$	4.65	4.74	9.49
3	0.57	0.9825	0.0175	0.0175	$1.3 \cdot 10^{-4}$	6.24	6.61	13.75
4	0.81	0.9457	0.0543	0.0543	$1.0 \cdot 10^{-3}$	11.64	12.88	26.53

Анализ результатов моделирования (табл. 3) не противоречит известным положениям [2], [10]–[13] и позволяет сделать следующие основные выводы:

– линейный рост нагрузки на канал связи (эксперименты 1–4) приводит к экспоненциальному росту вероятности потери и времени доставки сообщений в сети;

– рост разницы во времени передачи сообщений с различными сервисами доставки наблюдается при возрастании загруженности канала связи и обусловлен использованием механизмов повторной отправки сообщений с ответом по причине повышения вероятностей коллизий и истечения таймеров передачи;

– равенство вероятностей потери сообщений, доставляемых по сервисам с подтверждением и «запрос/ответ», обусловлено одинаковым числом попыток повторной передачи, достаточным для обеспечения высокой вероятности правильной доставки в транзакции (вероятность потери $p_{п} = 0.1$ % при нагрузке $\rho = 0.3$).

Описанные в статье модель и способ анализа позволяют выполнить количественную оценку основных характеристик передачи данных в сети индивидуально для каждого сервиса доставки сообщений и в зависимости от основных прото-

CSMA, широко используемого в распределенных fieldbus-сетях мягкого реального времени. Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые предложена модель, которая учитывает спорадический характер неоднородной по типам сообщений сетевой нагрузки узлов, с характерными для сервисов доставки таймерами и счетчиками передачи. Практическая значимость полученных результатов заключается в повышении корректности оценки характеристик передачи сообщений различных типов и возможности использования инструментария для проектирования каналов сетей с выбором допустимого состава узлов в каналах связи и используемых сервисов доставки сообщений для обеспечения требуемых характеристик быстродействия и надежности передачи сенсорной информации. Перспективы дальнейших исследований состоят в создании алгоритма проектирования информационно-управляющей сети с заданными характеристиками передачи информации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00070 «Алгоритмы проектирования информационно-управляющих сетей LonWorks с требуемыми вероятностными и временными характеристиками».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
2. Control Network Protocol Specification (ANSI/CTA-709.1-D). United States, 2014. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/cea/cea7092014ansi> (дата обращения 02.12.2018).
3. Köhler W. Simulation of a KNX network with EIBsec protocol extensions: building a KNX network with a simulation framework. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2010. 140 p.
4. Hong S.-H., Kim W. H. Bandwidth allocation scheme in the CAN protocol // Control Theory and Applications: IEEE Proc. 2000. Vol. 147. P. 37–44.
5. Hong S.-H., Lee J.-H. A bandwidth allocation scheme in fieldbuses // Intern. J. of Control, Automation, and Systems. 2010. № 8 (4). P. 831–840.
6. Lian F.-L., Moyne J. R., Tilbury D. M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. Technical Report: UM-MEAM-99-02, 1999. URL: <http://www-personal.umich.edu/~tilbury/papers/lmt99csm.pdf> (дата обращения 28.09.2016).
7. Tindell K., Burns A., Wellings A. J. Calculating controller area network (CAN) message response times // Control Engineering Practice. 1995. Vol. 3, № 8. P. 1163–1169.
8. Wen Li., Xiangyu Dai. Performance Evaluation Analysis about Ethernet and DeviceNet // Internet of Things. Communications in Computer and Information Science. 2012. Vol. 312. P. 64–69.
9. Mary G. I., Alex Z. C., Jenkins L. Response Time Analysis of Messages in Controller Area Network: A Review // J. of Computer Networks and Communications. 2013. Vol. 13. P. 1–11.
10. Moshe K. Collision resolution simulation for distributed control architectures using LonWorks // IEEE Intern. Conf. on Automation Science and Engineering, Edmonton, 2005. P. 319–326.
11. Miśkiewicz M. Analysis of mean access delay in variable-window CSMA // Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation Intern. 2007. Vol. 7. P. 3535–3559.
12. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol // Computer Standards & Interfaces. 2009. Vol. 31 (3). P. 548–556.
13. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type // Proc. of IEEE Intern. Workshop on Factory Communication Systems WFCS, Wien, 2004. P. 127–136.
14. Dadenkov S. A. The simulation of p-persistent CSMA algorithm of unequal random multiple access // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. № 2(45). P. 98–107.
15. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. И. И. Грушко; под ред. В. И. Неймана. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

S. A. Dadenkov, E. L. Kon

Perm national research polytechnical university

MODEL INFORMATION MANAGEMENT NETWORK WITH AN ALGORITHM OF RANDOM MULTIPLE ACCESS PERSISTENT CSMA

A model of an information control network with a random multiple access algorithm with carrier control and network prediction of a predictive p-persistent CSMA network and a method for estimating the probability and time characteristics of information transmission are being developed. The object of the research is the process of information exchange in fieldbus-networks LonWorks, BacNet with the analyzed algorithm. The aim of the work is to improve the accuracy quantitative estimates of the characteristics of time and reliability of the delivery of information messages. An analytical review of scientific publications devoted to the analysis of the characteristics of networks with random access algorithms was performed, which allowed us to identify the solution methods used, as well as the degree of problem elaboration. The use of the obtained information allowed to highlight the problem of accounting in the models of a number of significant parameters of functioning, and also to choose an effective mathematical apparatus for its solution. As a result of the work, a network model was created with the predictive p-persistent CSMA algorithm and a method for evaluating information transfer characteristics. Advantages over analogues consist in the correct accounting of sporadic and heterogeneous in delivery services network load of nodes.

Network model, random multiple access, probabilistic and temporal characteristics, information transfer, industrial network, sensor network, LonWorks, fieldbus, predictive p-persistent CSMA
