

УДК 681.5

А.В. Антинескул, С.А. Даденков, Е.Л. КонПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ
LONWORKS В СОСТАВЕ АСУТП**

В статье предлагается решение проблемы обеспечения качества управления автоматизированных систем управления, реализованных в инфраструктуре распределённых промышленных (fieldbus) систем. Проблема вызвана негативным влиянием спорадического информационного запаздывания распределённой системы на показатели качества управления. Известные способы решения проблемы связаны с перепроектированием системы на этапе её ввода в эксплуатацию, что определяет множество недостатков. В настоящей работе решение предлагается в виде алгоритма проектирования распределённой системы управления (с технологией доступа CSMA) с требуемыми стоимостными и вероятностно-временными характеристиками, обеспечивающими заданное качество управления. Выполнен анализ существующих подходов к проектированию распределённых информационных промышленных систем сбора и обработки технологической информации в составе АСУТП с заданными вероятностными и временными характеристиками. Отмечена низкая степень проработки вопросов количественной оценки характеристик и конструктивного построения системы, что определяет проблему точности и неэкономичности проектирования. Предложен алгоритм проектирования инфраструктуры распределённой промышленной системы LonWorks АСУТП с определенными по техническому заданию вероятностно-временными характеристиками. Предложенный алгоритм отличается от существующих подходов корректностью, повышением адекватности количественных оценок вероятностных и временных характеристик, за счёт учёта ранее не анализируемых факторов и задержек обработки информации приложением узла системы. Предложены частные способы количественной оценки характеристик, позволяющие использовать алгоритм для проектирования инфраструктуры системы LonWorks.

Ключевые слова: автоматизированная система, аналитический расчёт, время доставки, вероятность потерь, проектирование инфраструктуры, распределённая промышленная система, оценка производительности, LonWorks, CSMA.

A.V. Antineskul, S.A. Dadenkov, E.L. Kon

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE BASIC ALGORITHM FOR THE DESIGN OF LONWORKS
BASED INDUSTRIAL INFORMATION SYSTEM INFRASTRUCTURE
AS A PART ON INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM**

The article proposes the solution of ensuring management quality of automated control systems realized in infrastructure of the distributed industrial (fieldbus) systems. The problem is caused by negative influence of distributed system sporadic information delay on management quality factors. Existing solutions are associated with a redesign of the system at the commissioning phase that implicates a number of disadvantages. The article proposes the solution in the form of distributed control system design algorithm (with CSMA technology of access) with the required cost, probabilistic and time characteristics providing specified management quality. The analysis of existing approaches to design information-gathering and processing subsystem in distributed industrial control systems (ICS) with pre-determinate time-probabilistic parameters is conducted. It's stated that the problem elaboration degree in the field of ICS characteristics quantitative assessment and structural arrangement of ICS stands on very low level. Therefore, the algorithm for design the distributed industrial ICS, based on the LonWorks technology, with pre-determinate time-probabilistic parameters, is proposed. The offered algorithm differs from the existing approaches in a correctness, increase of adequacy of quantitative estimates of probabilistic and temporary characteristics, at the expense of the accounting of earlier not analyzed factors and delays of information processing by the appendix of knot of system. The private ways of a quantitative assessment of characteristics allowing to use algorithm for design of infrastructure of the LonWorks system are offered.

Keywords: automated system, analytical calculation, response time, probability of loss, ICS design, industrial control system, performance evaluation, LonWorks, CSMA.

Введение. Сегодня задача проектирования инфраструктуры информационно-технологической промышленной системы в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами (АСУТП), различными инженерными подсистемами играет важную роль в народном хозяйстве. Особо значимым является обеспечение при проектировании вероятностных и временных характеристик (ВВХ), которые обеспечивают заданные по техническому заданию АСУТП показатели качества управления технологическим процессом, сбора и обработки технологической информации.

Сложность проектирования современных промышленных fieldbus-систем обусловлена их распределённой архитектурой, а также множеством принципов и факторов функционирования используемых технологий, модели которых корреспондируют с уровнями модели взаимодействия открытых систем (OSI). Существует комплекс проблем проектирования, среди которых следует выделять анализируемые

в работе проблемы адекватности выполняемых количественных оценок ВВХ информационной промышленной системы, недоиспользованности ресурса шины данных, конструктивности и механизмов построения системы и другие. Настоящая работа посвящена разработке базового конструктивного алгоритма проектирования информационных промышленных систем с протоколами случайного множественного доступа (CSMA, иллюстрируемого в работе на примере распространённой системы LonWorks) с требуемыми характеристиками, отличающегося от известных конструктивной последовательностью механизмов построения инфраструктуры системы, а также корректностью аналитических соотношений, предложенных для оценки ВВХ. Применение термина «базовый» в алгоритме вызвано необходимостью выделения его предназначения для первичного оперативного проектирования инфраструктуры системы в составе АСУТП, с принятыми ограничениями на допустимую загрузку сегментов распределенной системы (т.е. сети). Отмечается перспективность разработки в области проектирования адекватных моделей и методов количественной оценки ВВХ, проработки механизмов проектирования, что позволяет решить свойственную алгоритмам построения системы проблему неэкономичности, выражаемую в недоиспользованности ресурса сегментов шины данных распределённой АСУТП.

Анализ подходов к проектированию информационной промышленной системы. Целью выполнения анализа подходов к проектированию систем с методами множественного доступа узлов к разделяемой среде передачи является определение свойственных подходов недостатков, устранение которых необходимо в рамках разрабатываемого алгоритма проектирования для обеспечения заданных требованиями вероятностных и временных характеристик.

Аналитический обзор подходов и готовых проектных решений определяет проблему фактического отсутствия алгоритма, пригодного для проектирования промышленных систем со случайным доступом, учитывающего спектр присущих им особенностей и факторов функционирования. Проблема также обусловлена отсутствием чёткой и обоснованной последовательности шагов построения инфраструктуры системы с требуемыми ВВХ. Подобная ситуация определяет необходимость выполнения более глубокого анализа существующих подходов к проектированию и выделению свойственных им недостатков

для различных распределённых систем с методами случайного доступа узлов к среде передачи.

Одна из проблем адекватного проектирования обусловлена отсутствием корректных моделей и методов количественной оценки характеристик промышленной системы, а также методов модификации/проектирования её инфраструктуры. В условиях отсутствия указанного инструментария для промышленных систем в целом, и для технологии LonWorks в частности, широкое распространение находит подход к проектированию, получивший название принципа поиска технических решений – «случайное блуждание». Недостатки данного подхода связаны с отсутствием конструктивизма и с необходимостью натурального моделирования. Недостатки определяют: проблему стоимости проектирования системы на натурном стенде, с использованием избыточного объёма программно-аппаратного обеспечения; высокие трудовые затраты, связанные с анализом всевозможных случайных технических решений, определением и установлением соответствия сетевых характеристик заданным требованиям.

Частичное решение, свойственное подходу «случайное блуждание», найдено в рамках создания подхода к построению исторически первой сети Aloha, а позже и для всех последующих, в том числе Ethernet, с алгоритмом случайного доступа узлов к разделяемой среде передачи. Основу решения составляют результаты многочисленных исследований [1–3] влияния интенсивности информационной нагрузки на величину коэффициента полезного использования пропускной способности канала для различных алгоритмов доступа (рис. 1). Полезное использование канала представляет величину отношения объёма успешно переданной полезной информации к максимально возможному объёму передачи информации за единицу времени.

Первый рабочий участок (диапазон А) графика для каждого метода доступа характеризуется линейной зависимостью (ростом) величины полезного использования канала в зависимости от формируемой узлами системы информационной нагрузки. На данном этапе полезное использование канала равняется загрузке канала. С ростом нагрузки шина данных переходит из рабочего в режим насыщения, характеризуемый снижением эффективного использования канала. При этом переход в режим насыщения характеризуется фактическим быстрым ростом реальной загруженности канала, которая стремится к единице. Это

объясняется повышением вероятности коллизий, необходимостью повторных передач сообщений, а также возросшим временем доступа к каналу за счёт попыток предотвращения коллизий. Полученный исследователями результат устанавливает величину максимально допустимой загруженности канала, при которой канал системы находится в рабочем состоянии, т.е. определяет возможность нормального функционирования подсистемы передачи информации. Допустимый уровень загруженности сетевого канала для исследуемой сети LonWorks составляет величину равную, 0,5.

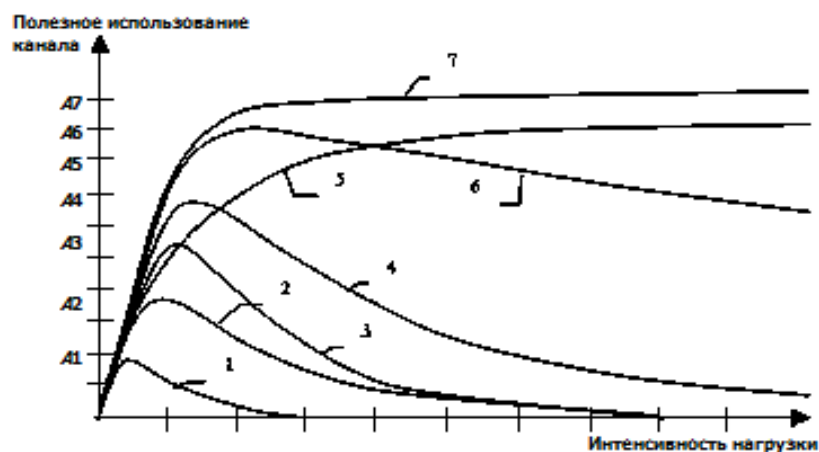


Рис. 1. График эффективности использования канала: 1 – чистая Aloha; 2 – дискретная Aloha; 3 – CSMA с настойчивостью 1; 4 – CSMA с настойчивостью 0,5; 5 – ненастойчивый CSMA; 6 – CSMA с настойчивостью 0,1; 7 – CSMA с настойчивостью 0,01

В изученных работах также отмечен нелинейный рост загрузки канала в рамках завершения рабочего (A) режима канала. Это определяет нелинейное ухудшение и вероятностных, и временных характеристик передачи информации. Кроме этого, с ростом загруженности канала в рабочем режиме на ВВХ начинают влиять такие факторы, как очереди, коллизии передачи, повторная отправка сообщений и другие протокольные факторы. Это определяет необходимость учёта представленных факторов в рамках количественной оценки характеристик. Решению данной проблемы посвящено большое количество работ для различных технологий [4–9]. Ввиду сложности решения указанной задачи находит широкое применение подход к проектированию, основанный на упрощающем ограничении загруженности сетевого канала,

свойственном в общем всем системам со случайным доступом. Принятое ограничение позволяет не учитывать влияние вышеуказанных факторов функционирования на ВВХ, используя при оценке ВВХ простые базовые аналитические соотношения из литературы. Недостатком данного подхода является экономическая неэффективность проектирования, обусловленная созданием недоиспользованности ресурса шины данных по сравнению с допустимой загруженностью канала (см. рис. 1). Однако в сравнении со «случайным блужданием» подход характеризуется: отсутствием недостатков, присущих натурному проектированию; частичным решением задачи случайного поиска технического решения (снижения загрузки канала). Нерешёнными, в том числе для LonWorks, остаются недостатки точности выполняемых оценок ВВХ и конструктивного механизма проектирования. Первый недостаток основан на том, что все производимые расчёты в известной литературе [4–8] связаны только с транспортной подсистемой промышленной fieldbus-сети и не учитывают другие подсистемы, значимо влияющие на временные характеристики. В частности, не учитывается влияние прикладной подсистемы на ВВХ, значимость которой показана в работах [4–8] и др. Данное обстоятельство определяет недостаток адекватности производимого проектирования. Отсутствия конструктивного проектирования приводит к отсутствию чётких шагов, механизмов проектирования (модификации) при несоответствии сети заданным вероятностным и временным характеристикам.

Весь перечень указанных недостатков существующих подходов к проектированию определяет необходимость решения в работе задач разработки алгоритма проектирования промышленной системы, на примере распространённой технологии LonWorks.

Алгоритм проектирования инфраструктуры промышленной системы АСУТП с заданными вероятностными и временными характеристиками. Техническое задание (ТЗ) на проектирование включает в свой состав перечень предъявляемых к проектируемой системе требований, а также спектр необходимых исходных данных. Задание на проектирование содержит информацию о функционале проектируемой автоматизированной системы, выбранный экспертами состав программного и аппаратного обеспечения (контроллеров, датчиков и исполнительных механизмов), результаты анализа (моделирования) контуров проектируемой АСУТП и установленные требования

к временным и вероятностным характеристикам информационной промышленной шины, исполнение которых обеспечивает функционирование автоматизированной системы с заданным качеством управления, сбора и обработки информации. Таким образом, состав технического задания включает:

1. Спектр узлов промышленной системы: контроллеров, датчиков и исполнительных механизмов, обеспечивающих заданный функционал системы.

2. Схема логической связи (коммуникации) узлов системы (рис. 2). Элементами схемы являются узлы [1..N] с распределенными по ним датчиками и исполнительными механизмами. Схема иллюстрирует не только наличие логических связей, но и планируемое физическое расположение узлов в сети, что необходимо учитывать при проектировании архитектуры. Исходная схема системы предполагает объединение всех узлов в рамках общего сегмента, образующего исходную архитектуру (далее – исходный фрагмент) проектируемой системы.

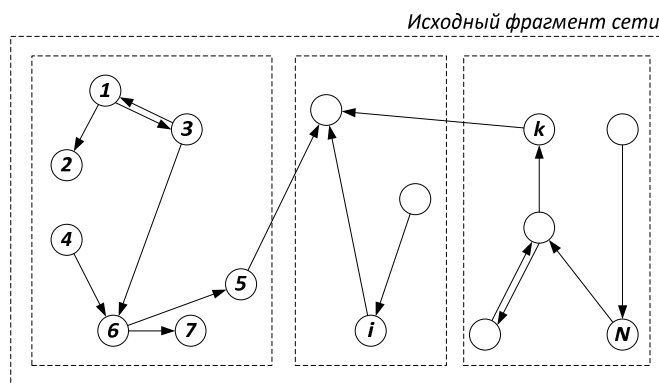


Рис. 2. Пример исходной схемы проектируемого сегмента системы

3. Параметры коммуникационных взаимодействий узлов в системе указываются в матрице связности (межузлового взаимодействия, размерности $N \times N$ узлов). Строки матрицы содержат информацию об исходящей от каждого узла системы информации, а столбцы – информацию о входящей. Ячейка матрицы связности содержит детальную информацию о каждом коммуникационном взаимодействии пары узлов (рис. 3): исходная интенсивность передачи информации (определяется приложением узла, без учёта сервиса доставки), сервис доставки (А – «без подтверждения», Б – «с подтверждением», В – «запрос–

ответ», Г – «без подтверждения с повторением»). Общее количество модулей приложения узлов передатчика и приёмника указывается соответственно в первом столбце и строке таблицы (см. рис. 3).

Узел	1 (5)	1 (6)	3 (4)	...	$N (n)$
1 (5)		20А	25Б	–	–
2 (6)	–		–	–	–
3 (4)	15Б	–		–	–
...	–	–	–		–
$N (n)$	–	–	–	10А	

Рис. 3. Пример матрицы связности

Значения исходных параметров выбираются группой экспертов таким образом, чтобы обеспечить требуемый уровень частоты и надёжности доставки информации. По умолчанию выбирается канал на основе низкоскоростной витой пары ТР/FT-10.

4. Спектр требований на допустимые значения вероятностных и временных характеристик для различных коммуникационных взаимодействий узлов в системе (определённых датчиков, контроллеров и исполнительных механизмов). Требования включают широкий спектр общих для промышленных систем вероятностных и временных характеристик [9]. Спектр требований на ВВХ представляется в форме матрицы требований со структурой, идентичной матрице межузлового взаимодействия. Идентичность структур матриц определяет в ходе проектирования простоту сравнительного анализа расчётных характеристик и требуемых по техническому заданию.

Алгоритм проектирования инфраструктуры распределённой промышленной системы с требуемыми ВВХ. Разработка конструктивного алгоритма проектирования определяет необходимость включения следующих трёх последовательно реализуемых этапов построения инфраструктуры системы:

1. Оценка вероятностно-временных характеристик проектируемой системы.
2. Контроль соответствия характеристик требованиям.
3. Проектирование промышленной шины.

Представленная общая последовательность этапов определяет циклический алгоритм проектирования. Согласно алгоритму по

результатам количественной оценки характеристик проектируемой системы производится контроль их соответствия заданным по ТЗ требованиям, после чего выполняется проектирование системы с применением предлагаемых технических решений.

Предлагаемый алгоритм проектирования, как и множество проанализированных подходов, основывается на ограничении допустимой загруженности (15 %) участков шины данных. Расчёт загруженности ρ шины, выполняемый на первом этапе алгоритма, основывается на оценке отношения суммарной интенсивности λ_{Σ} информационной нагрузки узлов сегмента системы к интенсивности обслуживания μ типового сообщения:

$$\rho = \lambda_{\Sigma} / \mu. \quad (1)$$

Расчёт суммарной информационной нагрузки на шину данных необходимо производить с учётом сервиса доставки, а значит, с учётом интенсивностей формирования узлами ответных и повторных передач. Такие интенсивности предусмотрены для сервисов типа Б, В, Г [8]. Интенсивность обслуживания информационного сообщения в шине данных может быть определена величиной, обратной среднему времени доступа узла и передачи, учитывающему протокольные накладные расходы.

Количественную оценку вероятностно-временных характеристик проектируемой системы можно выполнить на основе упрощённых аналитических соотношений, представленных в работах [4–6] для транспортной и прикладной подсистем. Упрощение вводится, исходя из предположения о малой загруженности анализируемой шины данных проектируемого фрагмента системы, что позволяет отказаться от необходимости учёта ряда факторов функционирования (очереди сообщений, коллизии и повторные передачи и др.), значимость которых повышается с ростом загруженности шины. Среднее время доступа и передачи информационного сообщения по шине данных определяется по формуле

$$T_{\text{д}} = \beta_1 + \frac{BL \cdot W_{\text{base}} - 1}{2} \cdot \beta_2 + L/V, \quad (2)$$

где прогнозируемая на шину нагрузка $BL = 1$, L и V – размер и скорость передачи сообщения по шине данных, β_1 и β_2 – параметры протокола доступа для среды передачи TP/FT-10, $\beta_1 = 868$ мкс, $\beta_2 = 168$ мкс,

базовая ширина окна соперничества $W_{\text{base}} = 16$. Вероятностные характеристики, в том числе вероятность коллизии в шине, потери информации, принимаются с ничтожно малыми значениями, удовлетворяющими требованиям, что справедливо в условиях принятой низкой загруженности участков шин данных.

Для повышения точности оценки ВВХ наряду с задержкой, вносимой процессом передачи технологической информации по шине информации, необходим учёт задержки обработки, вносимой приложением узла приёмника и передатчика информации. Среднее время обработки информационного сообщения прикладной подсистемой узла промышленной системы (при генерации сообщения и обработке его получателем/отправителем) определяется по формуле

$$T_{\text{пр}} = \frac{n+m}{2} \cdot T_{\text{п}} + T_3 + T_{\text{в}}, \quad (3)$$

где n и m – число приоритетных и неприоритетных модулей приложения соответственно T – задержке обслуживания информации в точках входа, проверки, задачи.

Расчёт суммарной временной задержки обработки и передачи информации, индивидуально по каждому коммуникационному взаимодействию, должен выполняться с учётом процесса обслуживания информации в подсистемах распределённой системы:

$$T_{\Sigma} = a \cdot T_{\text{д}} + b \cdot T_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где a и b – количество фаз обслуживания информации в транспортной и прикладной подсистемах в рамках транзакции взаимодействия узлов в распределённой промышленной системе для доставки информации. Значения $a = 1$ в случае взаимодействия узлов в рамках локальной шины данных (исключением является сервис запрос/ответ, $a = 2$), и становится больше 1 (равным числу задействованных в передаче сегментов) при передаче между сегментами распределённой промышленной системы. Количество раз b обслуживания информации в прикладной подсистеме определяется сервисом доставки информации, для сервисов «с подтверждением» и «без подтверждения», с повторяемой передачей $b = 2$ (обработка в узле-передатчике и приёмнике), для сервиса запрос/ответ $b = 3$.

На втором этапе алгоритма проектирования промышленной системы производится контроль соответствия рассчитанной загруженности шины и вероятностных, и временных характеристик требованиям

технического задания. В случае несоответствия требованиям производится переход к этапу 3 выбора и реализации технического решения проблемы. В случае успешного построения фрагмента системы производится возврат к этапу 1 алгоритма для начала проектирования следующего фрагмента системы (рис. 4).

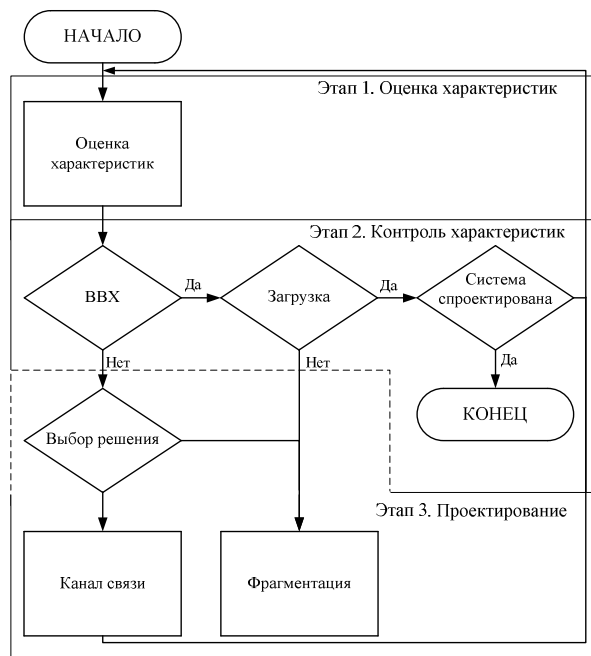


Рис. 4. Схема алгоритма проектирования промышленной системы с требуемыми BVX

Первоочередным делом является проверка соответствия расчётных BVX требованиям технического задания. В случае несоответствия требованиям осуществляется переход к этапу 3 для выбора и реализации механизма проектирования, направленного на устранение проблемы. После успешной проверки загруженности выполняется проверка соответствия загруженности проектируемого фрагмента шины данных. При несоответствии требований осуществляется переход к этапу 3 для выбора решения. В ином случае осуществляется переход к этапу 1 для начала проектирования следующего фрагмента промышленной системы, а при полном проектировании системы (см. рис. 4) – завершение алгоритма.

На третьем этапе алгоритма применяются технические решения для устранения проблемы проектирования системы, удовлетворяющей требованиям технического задания. На этапе применяются два

основных технических решения, используемых для обеспечения требуемых характеристик: фрагментация участка и изменение типа канала связи системы.

Фрагментация сегмента системы производится путём разделения проектируемого участка распределённой системы на два, по критерию равенства информационной нагрузки узлов, с учётом сервисов доставки. Основной целью решения является снижение загрузки шины данных под заданные требования, что может быть использовано в условиях, когда проектируемый фрагмент шины данных удовлетворяет требованиям ВВХ. Когда сегмент не удовлетворяет требованиям ВВХ, решение может быть применено при условии, что прогнозируемая фрагментация позволит отделить от фрагмента системы узлы, требования которых не могут быть выполнены в рамках текущего фрагмента с низкой пропускной способностью канала связи.

Решение типа «изменение типа канала связи» производится путём выбора канального оборудования шины, определяющего большую пропускную способность, что позволяет уменьшить задержку передачи технологической информации по шине. Таким образом, решение применяется в случае, когда проектируемый фрагмент системы не удовлетворяет требованиям ВВХ и для его проектирования не может использоваться приём фрагментации, либо его использование нецелесообразно.

Заключение. В работе впервые предложен общий конструктивный алгоритм проектирования информационной промышленной системы с заданными вероятностными и временными характеристиками, функционирующей на основе алгоритмов случайного множественного доступа CSMA. Предложены частные способы количественной оценки характеристик, позволяющие использовать алгоритм для проектирования инфраструктуры системы LonWorks. Наряду с преимуществом конструктивности предложенный алгоритм отличается от существующих подходов повышением адекватности количественных оценок ВВХ за счёт учёта ранее не анализируемых факторов и задержек обработки информации. Алгоритм сохраняет недостаток неэкономичности построения системы, присущий подходам проектирования с ограничениями на низкий уровень загрузки сегментов шины данных. Для решения данной проблемы в настоящий момент прорабатываются вопросы создания алгоритма проектирования с использованием предложенных авторами в работах [10, 11] адекватных моделей и способов

количественной оценки характеристик, учитывающих широкий спектр факторов функционирования, свойственных высоконагруженным системам и их шинам данных.

Библиографический список

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2010. – 916 с.
2. Новиков Ю.В., Кондратенко С.В. Локальные сети: архитектура, алгоритмы, проектирование. – М.: ЭКОМ, 2000. – 308 с.
3. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ, 2005. – 288 с.
4. Moshe Kam. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. – Edmonton, Canada: IEEE, 2005. – P. 319–326.
5. Miśkiewicz M. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA // Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International. – 2007. – Vol. 7. – P. 3535–3559.
6. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol // Computer Standards & Interfaces. – Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. – P. 548–556.
7. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type // Proceedings of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2004. – Wien, 2004. – P. 127–136.
8. Дитрих Д., Лой Д., Швайнциер Г.Ю. LON-технология, построение распределенных приложений: пер. с нем. / под ред. О.Б. Низамутдинова. – Пермь: Звезда, 1999. – 242 с.
9. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
10. Даденков С.А., Кон Е.Л. Подход к построению аналитической модели информационно-управляющей сети LonWorks на основе нейрочипов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2013. – № 11. – С. 64–69.
11. Даденков С.А., Кон Е.Л., Чмыков В.В. Имитационная модель промышленной сети (на примере технологии LonWorks) // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций ПТиТТ-2014: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 82–84.

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'uternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies and protocols]. Saint Petersburg: Piter, 2010. 916 p.
2. Novikov Iu.V., Kondratenko S.V. Lokal'nye seti: arkhitektura, algoritmy, proektirovanie [Local networks: architecture, algorithms, design]. Moscow: EKOM, 2000. 308 p.
3. Krylov V.V., Samokhvalova S.S. Teoriia teletrafika i ee prilozheniia [Teletraffic theory and its application]. Saint Petersburg: BKhV, 2005. 288 p.
4. Moshe Kam. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Edmonton, Canada: IEEE, 2005, pp. 319-326.
5. Miśkowicz M. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA. *Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International*, 2007, vol. 7, pp. 3535-3559.
6. Miśkowicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol. *Computer Standards & Interfaces*. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009, pp. 548-556.
7. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type. *Proceedings of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2004*. Wien, 2004, pp. 127-136.
8. Ditrikh D., Loi D., Shvaintser G.Iu. LON-tekhnologiia, postroenie raspredelennykh prilozhenii [LON-technologies, distributed systems design]. Perm': Zvezda, 1999. 242 p.
9. Denisenko V.V. Komp'uternoie upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem [Computer aided process, experiment and equipment control]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2009. 608 p.
10. Dadenkov S.A., Kon E.L. Podkhod k postroeniiu analiticheskoi modeli informatsionno-upravliaiushchei seti LonWorks na osnove neurochipov [Approach to the data management system LonWorks analysis model design on the base of neuron-chip]. *Neirokomp'iutery: razrabotka, primenenie*, 2013, no. 11, pp. 64-69.

11. Dadenkov S.A., Kon E.L. Chmykov V.V. Imitatsionnaia model' promyshlennoi seti (na primere tekhnologii LonWorks) [Fieldbus network simulant (using LonWorks technology as an example)]. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsii PTiTT-2014"*. Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014, vol. 1, pp. 82-84.

Сведения об авторах

Антинескул Антон Владимирович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aantineskul@at.pstu.ru).

Даденков Сергей Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dadenkov@rambler.ru).

Кон Ефим Львович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kel-40@yandex.ru).

About the authors

Antineskul Anton Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer of Automatics and telemechanics Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: aantineskul@at.pstu.ru).

Dadenkov Sergei Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer of Automatics and telemechanics Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: dadenkov@rambler.ru).

Kon Efim Lvovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Professor of Automatics and telemechanics Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kel-40@yandex.ru).

Получено 20.04.2016