

УДК 62-503.5

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АПЕРТУР ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕДОБЫЧЕЙ¹

Статья поступила в редакцию 20.07.2015, в окончательном варианте 14.09.2015.

***Зебзеев Алексей Григорьевич**, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Российская Федерация, г. Томск, проспект Ленина, 30, e-mail: ZebzeevAG@nipineft.tomsk.ru*

Рассмотрена проблема множественного доступа к среде передачи данных системой диспетчерского управления на объектах добычи нефти. С целью увеличения быстродействия передачи данных обосновано использование методов обеспечения случайного доступа к среде. Автором определены недостатки указанных методов, проанализированы возможные способы их устранения. В качестве дополнительных мер улучшения характеристик передачи данных предложено использовать управление загруженностью канала связи центральной базовой станции с помощью поддержания объема передаваемой информации на допустимом уровне. Для обеспечения возможности управления сетевым трафиком обосновано применение событийного (спорадического) режима опроса данных с контролируемых объектов нефтедобычи. С целью изучения объекта управления был проведен анализ динамики технологических процессов на основе ретроспективных данных конкретного нефтедобывающего предприятия. При этом было выявлено, что основными причинами возникновения событий являются изменения значений непрерывных параметров (телеизмерений) на пороговую величину (апертуру). В силу этого адаптивное управление величинами апертур телеизмерений для ограничения загруженности сети связи является целесообразным. В качестве методологии разработки адапционного алгоритма предложено использование одного из оптимизационных методов – нечеткого вывода Мамдани на основе формализованных критериев оптимальности. Компьютерное моделирование процесса передачи данных технологического процесса и анализ полученных результатов подтвердили эффективность применения предлагаемого подхода. Таким образом, было показано, что предлагаемая автором методика позволяет поддерживать загруженность сети на допустимом уровне при высокой достоверности отображения динамики технологического процесса в пункте управления.

Ключевые слова: управление трафиком, событийный подход, спорадическая передача данных, апертура телеизмерений, критерий оптимальности, алгоритм нечеткого вывода Мамдани, вычислительный эксперимент

ALGORITHM FOR APERTURE TELEMETRY SUPERVISORY SYSTEM OIL PRODUCTION

***Zebzeev Aleksey G.**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: ZebzeevAG@nipineft.tomsk.ru*

The article deals with the problem of multiple access transmission medium supervisory system on objects of oil production. In order to increase the speed of data transfer is justified using random access medium. The author has identified disadvantages of these methods and how to resolve them. As additional measures to improve the characteristics of the network load control prompted the central link of the base station by keeping the volume of information transmitted at an acceptable level. To be able to manage network traffic provides the use of event-driven (sporadic) mode survey data from controlled oil production facilities. In order to study the control object analyzed the dynamics of technological processes on the basis of historical data Oil Company. The analysis showed that the main causes of events are changes in the values of continuous parameters (telemetry) on the threshold (aperture). This determined the feasibility of adaptive control aperture value telemetry to limit network congestion. As an adaptive algorithm development methodology proposed the use of one of the optimization methods - Mamdani fuzzy inference on the basis of formal criteria of optimality. Computer modelling the transfer of process data and analysis of the results confirmed the

effectiveness of the proposed approach. As a result, it was shown that the proposed technique allows the author to support the load of the network at an acceptable level of reliability at high dynamics of the process display in the control centre.

Keywords: traffic management, event approach, sporadic data transmission, telemetry aperture, optimality criterion, the algorithm of fuzzy inference Mamdani, computer experiment

Введение. Для территориально распределенных объектов нефтедобычи характерна большая удаленность отдельных элементов инфраструктуры друг от друга и по отношению к центральному диспетчерскому пункту. С целью сокращения издержек на реализацию оперативной передачи производственных данных в рамках обеспечения возможности удаленного диспетчерского управления технологическими процессами достаточно эффективным решением является применение систем радиосвязи [5]. Для систем типа «точка – многоточка», характерных для объектов нефтедобычи, необходима организация множественного доступа для распределения информационного ресурса. Среди таких методов выделяют статические, случайные и комбинированные [8]. Для систем с высокими требованиями к быстродействию и с большим числом низкоскоростных терминалов, генерирующих пульсирующий трафик, предпочтительно использование методов случайного доступа. Однако недостатком таких методов является отсутствие «гарантированного» времени доставки данных – из-за наличия коллизий при одновременной передаче пакетов от абонентских станций и некоторой задержки перед передачей пакета [20]. Хотя методы устранения указанных недостатков и обсуждаются в специальной литературе [1, 2, 7, 10, 11, 15, 16, 21, 23], но ряд практически важных направлений остается исследованным недостаточно полно. Поэтому цель данной статьи – анализ адаптационных алгоритмов, позволяющих управлять объемом передаваемых производственных данных при различных условиях протекания технологического процесса.

Методы снижения числа коллизий при случайном доступе. Многие такие методы направлены на увеличение скорости передачи информации [10]. При этом применяются специальные меры по повышению достоверности и помехоустойчивости при передаче сигналов: специального кодирования [11, 16]; разграничения полосы частот [2, 9]; использования нескольких радиоантенн [15, 21]; оптимального выбора характеристик беспроводных сетей [1, 7]. Дополнительно развиваются новые протоколы и методы, снижающие риск возникновения коллизий. Одними из наиболее распространенных в сетях беспроводного доступа являются протоколы стандарта IEEE 802.11 с «режимом распределенной координации» (Distributed Coordination Function). Они реализуют обнаружение несущей частоты и предотвращение коллизий – CSMA / CA (CarrierSenseMultipleAccesswithCollisionAvoidance) [8, 23]. Протокол CSMA / CA позволяет уменьшить число коллизий по сравнению с другими протоколами, в которых механизм обнаружения несущей не используется. Однако в системе радиосвязи объектов нефтедобычи, состоящей из базовой и нескольких абонентских станций (рис. 1), как правило, отсутствует полная связность среды (так называемая «проблема скрытых станций»). Это не позволяет полноценно «прослушивать» эфир.

Для подобных ситуаций разрабатываются дополнительные методы: механизм RTS / CTS (Request To Send / Clear To Send), а также его модификации [23]; различные алгоритмы управления параметрами протокола случайного множественного доступа [11]; сочетания с комбинированными методами [20] на основе централизованной функции координации (Point Coordination Function), расширенной функции распределенной координации (Enhanced DCF), гибридной функции координации (Hybrid Coordination Function), многостанционного доступа с кодовым разделением каналов и прямым расширением спектра (DS-CDMA) и т.д.

Однако эти методы не решают полностью проблему перегруженности трафика при одновременном большом количестве событий производственного процесса, заявок на пере-

дачу служебного трафика с различных абонентских станций, а также при ухудшении условий передачи данных (включая увеличение зашумленности канала).

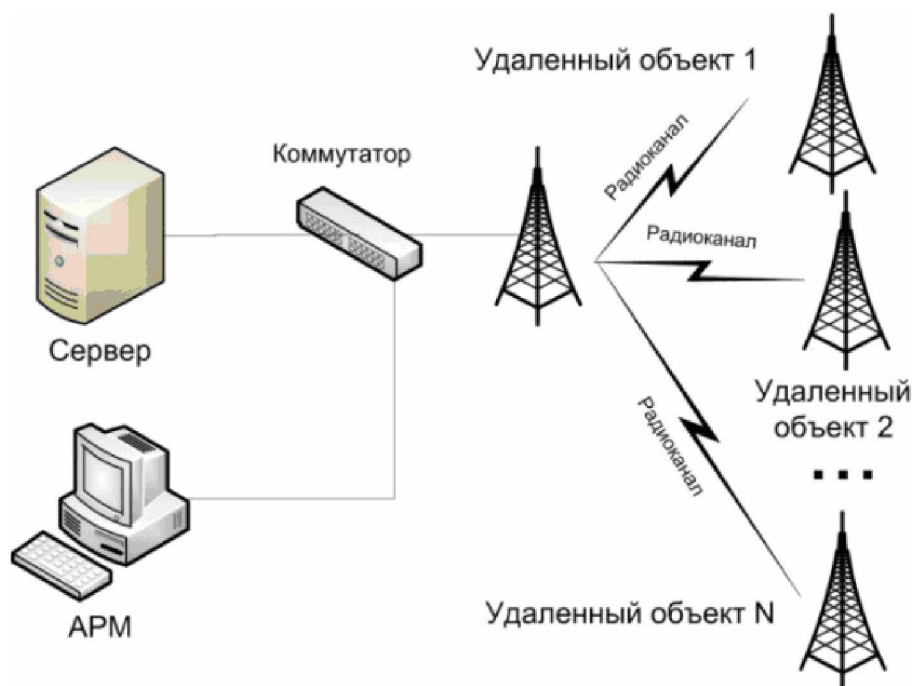


Рис. 1. Типовая структура организации радиосвязи на объектах нефтедобычи

Поэтому в практике проектирования ОАО «ТомскНИПИнефть» сложился следующий порядок работ: после определения структуры сети связи, расчета качественных показателей каналов связи (посредством специализированного программного обеспечения) и определения требований к характеристикам трафика (например, по допустимой задержке), делается запрос производителям оборудования радиосвязи. Они на основании собственных оценочных методик определяют максимально допустимое значение загруженности и соответствующее ему значение скорости передачи данных для проектируемой сети. Затем уточняется соответствие характеристик рассматриваемого оборудования требованиям процесса передачи информации. Для выполнения этих требований в проекты зачастую приходится закладывать оборудование с избыточными характеристиками, что обеспечивает очень большой резерв по необходимому информационному ресурсу системы. В связи с этим является актуальной задача адаптивного управления непосредственно объемом передаваемых данных – для достижения необходимых значений загруженности сети и достоверности передачи производственных параметров технологического процесса.

Событийная передача данных для управления объемом трафика. Для реализации управления объемом передачи данных является целесообразным использование событийного подхода. Событийные протоколы, как правило, позволяют существенно сократить количество передаваемых данных и потому рекомендуются многими производителями систем телемеханики для более эффективного использования каналов связи [14, 19]. Название «событийные» связано с тем, что один или несколько режимов работы протоколов (например, спорадический) предполагает передачу только тех данных, которые изменились. Для непрерывных сигналов (телеизмерений) устанавливается порог чувствительности к изменениям значения его величины относительно предыдущего замера – апертура. Дополнительно по событийным протоколам возможна передача информации по запросу с диспетчерского пункта.

Автором был проведен анализ динамики сетевого трафика на основе реальных ретроспективных данных для одного из нефтедобывающих предприятий Западно-Сибирского региона. Основными технологиями добычи нефти на месторождениях предприятия являются фонтанный способ и добыча с помощью электроцентробежных погружных насосов (эти способы типовые для региона). Проведенное исследование охватило 10 типов дискретных и 28 типов непрерывных сигналов. Для результатов измерений (сигнализаций) по каждому параметру отметим следующее: они были проанализированы для достаточного количества однотипных объектов, различных по характеристикам и свойствам технологических процессов; были использованы результаты для нескольких (не менее 3-х) длительных (по 24 ч) периодов измерений, разнесенных во времени; дискретность проведения измерений составляла 1 с. Анализ показал, что сетевой трафик системы телемеханики генерируется в основном за счет передачи технологических данных телеизмерений. Дополнительный трафик диагностической и / или служебной информации, а также телесигнализаций слабо влияют на загруженность каналов связи – из-за низкой частоты передачи (в среднем не более 4–6 раз в сутки).

При анализе сетевого трафика учитывалось следующее: в настоящее время автоматизированные системы управления в нефтедобыче реализуют ограниченное управление процессами без применения сложных алгоритмов (многоконтурных, адаптивных и пр.); управляющие воздействия в автоматическом режиме реализуются на локальном уровне без централизованного управления и не учитывают процессы на других объектах нефтедобычи. Например, в системе поддержания пластового давления значение рабочего давления нагнетания в нефтяной пласт устанавливается в широком диапазоне в зависимости от показателя приемистости пласта нефти (давления пласта) и номинального рабочего давления запорной арматуры. Регулирование давления нагнетания происходит с помощью электроприводных или механических штуцеров операторами в ручном (дистанционном или местном) или в автоматическом режиме. При этом изменение параметров регулирования на одной скважине не учитывает последствия такого регулирования для остальных объектов. Такой подход связан в первую очередь с высокой стоимостью комплексных решений, а также нехваткой специалистов-технологов, ориентирующихся в вопросах современных информационных технологий и способных применять комплексные модели управления. Причины такой ситуации – отсутствие в РФ достаточного опыта использования алгоритмов комплексного управления; недостатки централизованной системы профессиональной подготовки специалистов [3].

Из-за ограниченных возможностей управления пластовым давлением динамика изменения непрерывных сигналов на объектах нефтедобычи является в общем случае слабопредсказуемой. При этом для различных видов сигналов интенсивности их изменений, а следовательно, и необходимой частоты передачи данных, могут существенно отличаться.

Наиболее важные параметры, влияющие на объем трафика, – апертуры телеизмерений. Их значения для каждого из параметров должны определяться индивидуально. При установлении апертуры должны учитываться как расчетные возможности каналов связи, так и требования к достоверности передачи данных. Характеристики каналов связи изменяются во времени из-за различных помех, а также стохастических факторов, влияющих на протекание технологических процессов. При таких условиях целесообразно динамическое установление значений апертур телеизмерений в зависимости от внешних условий.

Анализ факторов, определяющих значения апертур. В [4] определены основные параметры, влияющие на устанавливаемые значения апертур; впервые предложено использование «двух уровней апертуры» – в качестве их граничных значений целесообразно использовать показатели достоверности (точности) телеизмерений.

Ниже будем использовать такие обозначения: $x_i(t) \in X(t)$ – непрерывная функция изменения i – параметра в составе множества всех n контролируемых системой параметров телеизмерений $X(t) = \{x_i(t) \dots x_n(t)\}$; $x_i(t_{\text{мек}}) \in X(t)$ – значение i -го параметра в текущий мо-

мент времени $t = t_{\text{мек}}$ (на момент последнего такта обработки данных); $x_i(t_o) \in X(t)$ – последнее значение i -ого параметра $x_i(t)$, которое было отправлено на диспетчерский уровень в момент времени $t = t_o$; $x_i(t_o) \in X(t)$ – последнее значение i -ого параметра, которое было добавлено в блок данных с возможностью отложенной отправки в момент времени $t = t_o$.

В таблице 1 даны предлагаемые автором ориентировочные значения показателей для основных параметров телеизмерений.

Достоверность ($s_{\text{до}}$ (x_i)) для i -ого параметра сохранения значений измерений (x_i) в базе данных (БД) – абсолютная или относительная. Она определяется бизнес-задачами и методиками анализа системы.

Точность визуализации ($s_B(x_i)$) для i -ого параметра на видеокadre диспетчера – абсолютная или относительная. Эта точность определяется целесообразностью оперативной отправки данных для обновления информации на видеокadre диспетчера (с учетом правил округления данных и необходимой точности представления информации). Например, $s_B(x_i)$ можно установить равным половине единичного значения последнего значащего разряда (десятичная система счисления) для i -ого параметра. Количество разрядов обычно небольшое (для удобства восприятия оператором), но достаточное для полноценного контроля за процессом.

Допустимая погрешность ($\delta(x_i)$) технического средства измерения для i -ого параметра – абсолютная или относительная. Значения погрешностей средств измерений в таблице 1 приведены типовые – в соответствии с требованиями [14]. Обозначения погрешностей: П.П. – приведенная, А.П. – абсолютная, О.П. – относительная.

Таблица 1

Ориентировочные значения показателей точности телеизмерений при нефтедобыче

Параметр телеизмерения	$s_{\text{до}}$	s_B	δ
Давление	0,001 МПа	0,005 МПа	П.П. $\pm 0,5\%$ (0,005–0,0125 МПа)
Температура	0,025 °С	0,05 °С	А.П. $\pm 1,0$ °С
Загазованность	0,025 %	0,05 %	О.П. $\pm 5,0\%$ (5,0 %)
Расход нефти (объем)	0,1 м ³ /сут	0,5 м ³ /сут	О.П. $\pm 1,0\%$ (0,5–7 м ³ /сут)
Уровень	0,1 мм	0,5 мм	А.П. $\pm 5,0$ мм
Оперативный учет жидкости	0,025 м ³ /ч	0,05 м ³ /ч	О.П. $\pm 2,5\%$ (1–5 м ³ /ч)
Оперативный учет газа	0,1 м ³ /ч	0,5 м ³ /ч	О.П. $\pm 5,0\%$ (50–500 м ³ /ч)
Обводненность	0,025 %	0,05 %	А.П. $\pm 2,5\%$
Плотность	0,0025 кг/м ³	0,005 кг/м ³	А.П. $\pm 0,1$ кг/см ³
Суточный массовый расход	0,1 т/сут	0,5 т/сут	О.П. $\pm 0,25\%$ (0,5–1 т/сут)
Ток	0,1 А	0,5 А	О.П. $\pm 5\%$ (18–25 А)
Напряжение	0,1 В	0,5 В	О.П. $\pm 5\%$ (18–25 В)
Частота	0,1 Гц	0,5 Гц	О.П. $\pm 1\%$ (0,5 Гц)

При определении границ изменения значений апертур для i -ого параметра удобно приводить их к абсолютным величинам с теми же единицами измерений, что и для самого параметра. Разные значения $s_B(x_i)$ и $s_{\text{до}}(x_i)$, а также использование метки времени при формировании блока данных определяют возможность использования блочной спорадической передачи информации на основе двух уровней апертуры.

Апертурой первого уровня $\Delta_1(x_i)$ измеряемого параметра $x_i(t)$ называется абсолютное или относительное значение порога чувствительности параметра $x_i(t)$ к изменениям

значения его текущей величины $x_i(t_{мек})$ относительно последнего отправленного значения $x_i(t_o)$, $t_{мек} > t_o$, при достижении которого необходима спорадическая передача данных (СПД) $x_i(t_{мек})$ на диспетчерский уровень без возможности отложенной отправки, т.е. при $t > t_{мек}$, причем $s_B(x_i) \leq \Delta_1(x_i) \leq \delta(x_i)$. Апертура второго уровня отличается от апертуры первого уровня тем, что допускает возможность отложенной отправки. Однако запаздывание отложенной отправки должно быть по возможности минимальным с целью отслеживания тренда телеизмерения на мониторе диспетчера с максимально высокой достоверностью (актуальностью). На рисунке 2 наглядно показана разница между апертурами двух уровней.

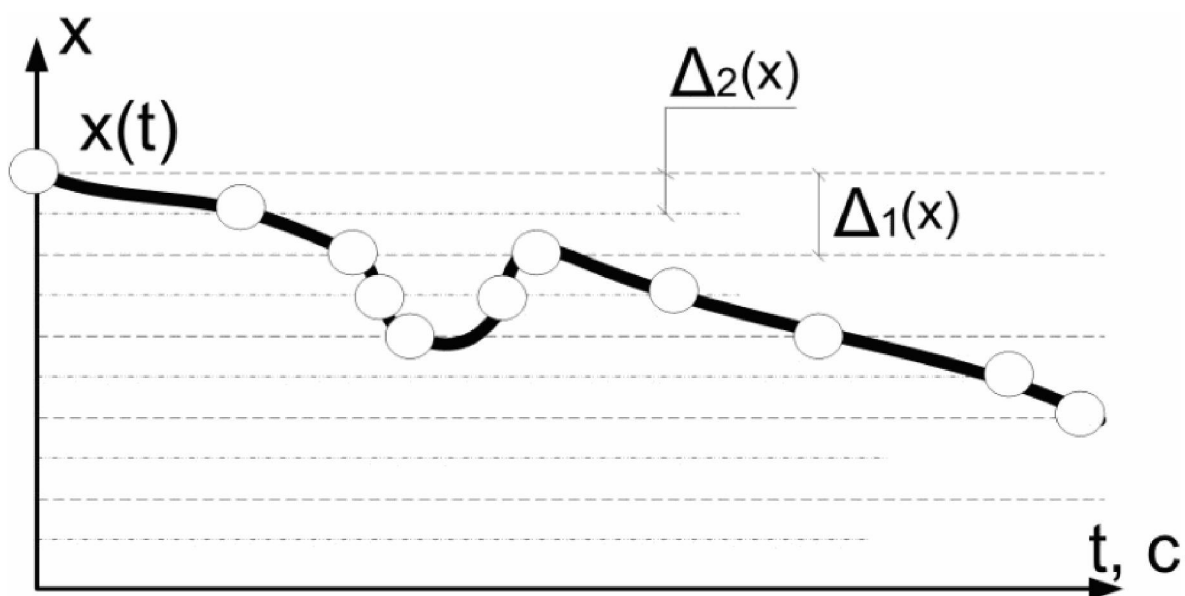


Рис. 2. Графическое представление двух уровней апертур

При пересечении линий (не более одного раза подряд) значением контролируемого параметра $x(t)$ происходит добавление текущего значения в блок передачи данных (для Δ_2), либо срочная передача текущего значения в диспетчерский пункт (для Δ_1). Алгоритм формирования блока данных прикладного уровня для отправки на диспетчерский уровень для архивирования и визуализации параметров был рассмотрен в [4].

В задаче управления потоками производственных данных приходится решать задачи, связанные с выбором наиболее «подходящих» значений апертур – при учете влияния внешней среды и характеристик оборудования. Такой выбор осуществляется в условиях многокритериального и конфликтного поведения системы с большим количеством параметров телеизмерений (в среднем порядка 100 на каждый объект); при наличии стохастических факторов, влияющих на протекание технологических процессов, а также различных ограничений на работу оборудования. Такая задача относится к классу многокритериальных оптимизационных и требует использования сложной математической модели, причем каждый показатель системы оценивается своим целевым функционалом. Их формирование и определение критериев оптимальности играет ключевую роль при управлении производственными потоками данных. Отдельное направление – исследование методологии решения оптимизационной задачи в условиях ограничения вычислительных ресурсов системы сбора, обработки и передачи нефтепромысловой информации с контроллеров. В технических зада-

ниях на системы автоматизации встречаются, в частности, требования по ограничению загрузки центрального процессорного устройства (ЦПУ), например: «Максимальная загрузка ЦПУ должна составлять не более 70 % его производительности, при средней загрузке ЦПУ 60 % и менее». В данной статье основной упор делается на решение задачи при такого рода ограничениях. В последующих работах предполагается подробно рассмотреть следующее: формальное обоснование предлагаемых критериев оптимальности; методы сведения многокритериальных задач оптимизации к однокритериальным за счет использования некоторых «интегральных» критериев.

Критерии оптимальности определения апертур. По результатам анализа ретроспективных данных нефтедобывающего предприятия автором установлено, что для значительной части времени наблюдения за контролируруемыми непрерывными параметрами справедливо относительно монотонное увеличение или уменьшение скорости их изменения. Поэтому оправдано использование методологии, основанной на прогнозировании величины загрузки канала связи по текущей динамике изменения непрерывных параметров.

Критерии оптимальности определения апертур определяются необходимостью решения следующих двух задач: (1) поддержание достоверности (точности) передачи данных на максимально возможном уровне; (2) поддержание загрузки каналов связи на допустимом уровне (не выше заданного). Для формального определения критериев необходимо оценить влияние факторов, установленных в [4], на значения апертур. Для уменьшения вычислительной сложности алгоритмов автором предлагается использование относительных (нормализованных) значений апертур для всех параметров $x_i(t)$:

$$\Delta_{rel}(x_i) \equiv \bar{\Delta}_{rel} k_m(x_i) = (\Delta(x_i) - \Delta_{\min}(x_i)) / (\Delta_{\max}(x_i) - \Delta_{\min}(x_i)), \quad (1)$$

где $\Delta_{\max}(x_i) = \delta(x_i)$; $\Delta_{\min}(x_i) = s_B(x_i)$ для апертуры первого уровня; $\Delta_{\min}(x_i) = s_{\delta\delta}(x_i)$ для апертуры второго уровня; $k_{m(2)}(x_i)$ – индивидуальный масштабирующий коэффициент для апертуры первого (второго) уровня параметра $x_i(t)$; $\bar{\Delta}_{rel}$ – относительное обобщенное значение апертуры; $\Delta_{rel}(x_i)$ – относительное значение апертуры параметра $x_i(t)$.

Уточненное вычисление значений $\Delta_{rel}(x_i)$ по каждому телеизмерению можно реализовать с помощью масштабирующих коэффициентов в завершающей части алгоритма:

$$k_{m1}(x_i) = 1 / (p(x_i)(1 + f(\eta) - f(x_i) + k_{\sigma} + k_r)), \quad (2)$$

$$k_{m2}(x_i) = 1 / (p(x_i)(1 - f(x_i) + k_{\sigma} + k_r)), \quad (3)$$

где n – количество контролируемых параметров телеизмерений; $f(\eta)$ – функция, значение которой определяется в зависимости от близости текущего значения параметра $x_i(t)$ к критическому значению – η ; $f(x_i)$ – функция, значение которой определяется в зависимости от скорости изменения параметра $x_i(t) - x'_i(t)$; k_{σ} – коэффициент, устанавливаемый в зависимости от возникновения связанного события; $p(x_i)$ – вес, определяющий меру значимости контроля параметра $x_i(t)$. Величина $f(\eta)$ не влияет на точность сохранения в БД и поэтому не учитывается в (3).

Таким образом, критерии оптимальности поддержания точности передачи данных на максимально возможном уровне определяются относительными обобщенными значениями апертур:

$$\bar{\Delta}_{rel1} \rightarrow \min; \bar{\Delta}_{rel2} \rightarrow \min \quad (4)$$

с ограничением:

$$\bar{\Delta}_{rel1(2)}(x_i) \in \{0 \dots 1\}. \quad (5)$$

Ограничение загруженности канала связи на j -ом контролируемом объекте определяется величиной рассогласования с допустимым значением и имеет вид:

$$\Delta L^j = L_{sub}^j - (Q_{data}^j(\Delta_{1,2}(x_i)) + Q_{serv}^j(\Delta_{1,2}(x_i))) \geq 0, \quad (6)$$

где для установленного периода: L_{sub}^j – допустимая загруженность (бит / с) канала связи для передачи производственной информации на j -ом контролируемом объекте; $Q_{data}^j(\Delta_{1,2}(x_i))$ – объем технологической информации (бит / с) на j -ом контролируемом объекте; $Q_{serv}^j(\Delta_{1,2}(x_i))$ – объем служебной информации (бит / с) на j -м контролируемом объекте протокола связи.

Объем технологической информации, формируемой из телеизмерений, определяется выражением:

$$Q_{data}^j = \Delta t \left(\sum_{i=1}^n V_{x_i} ((x'_i P(\Delta_2, x_i)) / \Delta_2(x_i) + v(\Delta_1(x_i))) \right),$$

где n – количество контролируемых параметров телеизмерений; V_{x_i} – объем (бит) величины телеизмерения $x_i(t)$ в составе пакета данных; x'_i – скорость изменения величины телеизмерения $x_i(t)$; Δt – установленный промежуток времени, за который измеряется средний объем передачи данных для оценки загруженности канала связи; $P(\Delta_2, x_i)$ – вероятность передачи $x_i(t)$ с возможностью отложенной отправки; $v(\Delta_1(x_i))$ – средняя частота передачи величины телеизмерения $x_i(t)$ из-за достижения апертуры первого уровня в течение времени Δ_1 .

Для вычисления средней частоты СПД телеизмерения $x_i(t)$ – $v(\Delta_1(x_i))$ необходимо определить время, через которое нужно выполнить передачу телеизмерения $x_i(t)$ в связи с достижением апертуры первого уровня или добавление $x_i(t)$ в блок данных с возможностью отложенной отправки. Время для первого варианта зависит от скорости изменения параметра $x_i(t)$ и от абсолютного значения апертуры первого уровня. Это время может быть вычислено по формуле $\tau_{\Delta_1}(x_i) = \Delta_1(x_i) / x'_i$.

С другой стороны, за это время может быть отправлено некоторое количество блоков данных. Если будут передаваться только полные блоки данных без прерываний из-за достижения $\Delta_1(x_j)$ любым из параметров $x_j(t)$, то количество отправленных блоков за это время будет минимально. Объем всех значений телеизмерений, требующих внесения в блок данных в течение времени τ_{Δ_1} определяется выражением: $q(\tau_{\Delta_1}) = \sum_{j=1}^n V(x_j) x'_j \tau_{\Delta_1} / \Delta_2(x_j)$ при условии равномерных изменений телеизмерений, т.е. $x'_j = const$. Тогда в течение времени $\tau_{\Delta_1}(x_i)$ может быть передано количество полных блоков данных прикладного уровня: $z_1(x_i) = q(\tau_{\Delta_1}) / Length_{req}$, где $Length_{req}$ – рекомендуемая длина блока данных.

Аналогично время, через которое необходимо заносить телеизмерение $x_i(t)$ в блок данных из-за достижения апертуры второго уровня может быть вычислено по формуле $\tau_{\Delta_2}(x_i) = \Delta_2(x_i) / x'_i$.

В течение этого времени может быть передано количество полных блоков данных прикладного уровня, вычисляемое: $z_2(x_i) = q(\tau_{\Delta_2}) / Length_{req}$.

На рисунке 3 представлена условная диаграмма формирования блоков данных, которая отражает распределение параметров телеизмерений в соответствии с течением технологического процесса. Порядок добавления информации в блок данных с непоследовательной очередностью характеризует формирование блока только в соответствии с протеканием процесса и динамикой достижения измеряемыми величинами значений апертур.

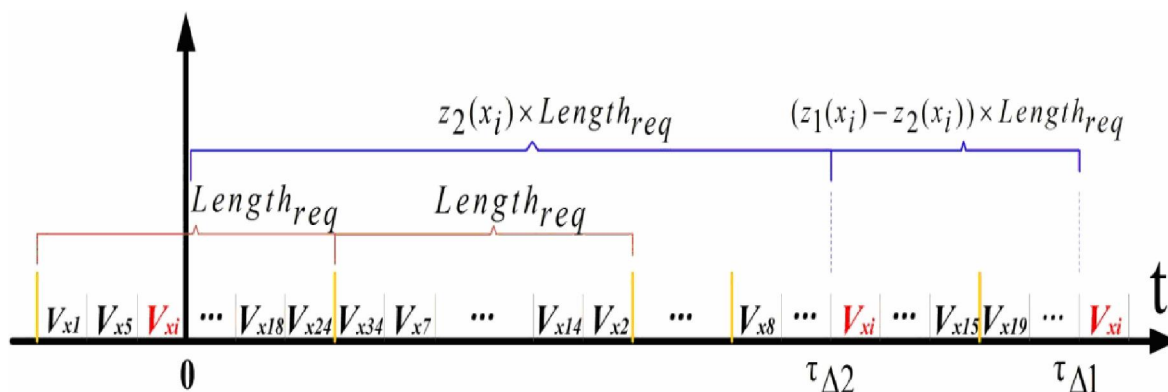


Рис. 3. Диаграмма формирования блоков данных

Под обозначением V_{x_j} , $j = \{1 \dots n\}$ на диаграмме условно подразумевается вся информация о параметре, включаемая в блок данных прикладного уровня при достижении апертуры. Это означает, что V_{x_j} включает как само значение телеизмерения V_{x_j} , так и дополнительные сведения, например, метку времени и тэг (рис. 4).



Рис. 4. Структура блока данных прикладного уровня (IEC 60870-5-104)

В зависимости от событийного протокола к сформированному блоку данных добавляется дополнительный заголовок приложения. На рисунке 4 изображена структура блока данных прикладного уровня протокола IEC 60870-5-104, где серым цветом выделен объем, занимаемый блоками данных. Таким образом, каждое телеизмерение занимает в блоке данных 13 байт. Очевидно, что наиболее рациональное использование каналов связи будет достигаться при отправке «полных» блоков данных, равных по размеру величине $Length_{req}$. Это условие выполняется при:

$$\Delta z(x_i) = z_1(x_i) - z_2(x_i) \geq 1, \forall x_i, i = \{1 \dots n\}, \quad (7)$$

т.е. когда значение параметра x_i , включаемое в блок данных при изменении на величину $\Delta_2(x_i)$, однозначно не будет включено в тот же блок данных, что и значение этого параметра, помещенное в блок для срочной отправки при изменении на величину $\Delta_1(x_i)$.

Если $\Delta z(x_i) = z_1(x_i) - z_2(x_i) < 1, \forall x_i, i = \{1 \dots n\}$, то есть вероятность, что блок данных не успеет заполниться и передаться до того момента, когда изменение $x_i(t)$ достигнет значения $\Delta_1(x_i)$. Причем чем меньше значение $\Delta z(x_i)$, тем выше эта вероятность. При $\Delta z(x_i) = 0$ эта вероятность равна 1.

Вероятность того, что значение $x_i(t)$ в момент времени τ_{Δ_1} будет добавляться в тот же блок, в который было добавлено значение этого параметра в момент времени τ_{Δ_2} , вычисляется по $P(\Delta z, x_i) = 1 - \Delta z(x_i) | \Delta z(x_i) < 1$. Очевидно, что $P(\Delta_2 x_i) = 1 - P(\Delta z, x_i)$.

Сложность расчета средней частоты $v(\Delta_1(x_i))$ связана с оценкой влияния других параметров $(x_j(t), i \neq j)$. Поэтому расчет выполняется в несколько этапов с помощью специально разработанного алгоритма.

В частном случае, когда другие параметры существенным образом не влияют на оценку средней частоты $v(\Delta_1(x_i))$, ее значение может определяться выражением:

$$v(\Delta_1, (x_i)) = \begin{cases} P(\Delta z, x_i) x_i / \Delta_1(x_i) | \Delta z(x_i) < 1; \\ 0 | \Delta z(x_i) \geq 1. \end{cases}$$

Наконец, объем служебной информации Q_{serv}^j в выражении (6) за установленный период времени вычисляется по $Q_{serv}^j = V_{serv} N_{ASDU}$; где V_{serv} – объем (бит) служебной информации в блоке данных; N_{ASDU} – количество блоков данных.

Необходимое количество блоков данных определяется выражением:

$$N_{ASDU} = Q_{data}^j / Length_{req} k_{fill},$$

где $k_{fill} \in \{0 \dots 1\}$ – коэффициент средней заполняемости блоков данных. Он вычисляется по

$$k_{fill} = Q_{data}^j / Q_{data}^j + 0,5 \times Length_{req} \times \sum_{i=1}^n (v(\Delta_1(x_i))).$$

Таким образом, количественные значения критериев оптимальности определения апертур определяются условием (4) при ограничениях (5), (6). Решение задачи поиска величин апертур может выполняться одним из известных способов оптимизации [17]. Для всех методов оптимизации существует проблема – значительное время вычислений в случае векторов большой размерности. Однако более точные методы часто работают слишком медленно и потому малоприменимы для использования в системах реального времени с невысокими вычислительными возможностями (характерно для применяемых средств управления). Поэтому для установления величин апертур телеизмерений предлагается использование методологии, позволяющей избежать чрезмерно большого объема вычислений – нечеткой логики [18, 24]. Существует много методов реализации управления, основанных на нечеткой логике. Автором работы предлагается использование алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Он сейчас получил, пожалуй, наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования [18].

Алгоритм нечеткого вывода определения апертур телеизмерений. При реализации алгоритма нечеткого вывода на основе установленных критериев оптимальности и ограничений необходимо определить их взаимное влияние. Противоречивость критериев оптимальности (4) с учетом ограничения (6) может заключаться в необходимости выполнения

также условий (7). При этом величина z_2 ($\bar{\Delta}_{rel2}$) должна быть в любом случае как можно меньше, а величина z_1 ($\bar{\Delta}_{rel1}$) может быть определена исходя из самого условия (7) на основании z_2 . В этом случае наиболее целесообразно использование метода главного критерия $\bar{\Delta}_{rel2} \rightarrow Min$ [17].

Тогда выполнение $\bar{\Delta}_{rel1} \rightarrow Min$ можно реализовывать после определения $\bar{\Delta}_{rel2}$. Для определения каждого из значений $\Delta_{rel1}(x_i)$, $\Delta_{rel2}(x_i)$ алгоритм Мамдани описывает несколько типовых последовательно выполняемых этапов. В данном случае нечеткий алгоритм реализует поиск отклонений ($d\Delta_{rel1}(x_i), d\Delta_{rel2}(x_i)$) от предыдущих значений $\Delta_{rel1}(x_i)$, $\Delta_{rel2}(x_i)$ для достижения более хороших значений. На рисунке 5 показана последовательность выполнения этапов на примере поиска $d\Delta_{rel2}(x_i)$.

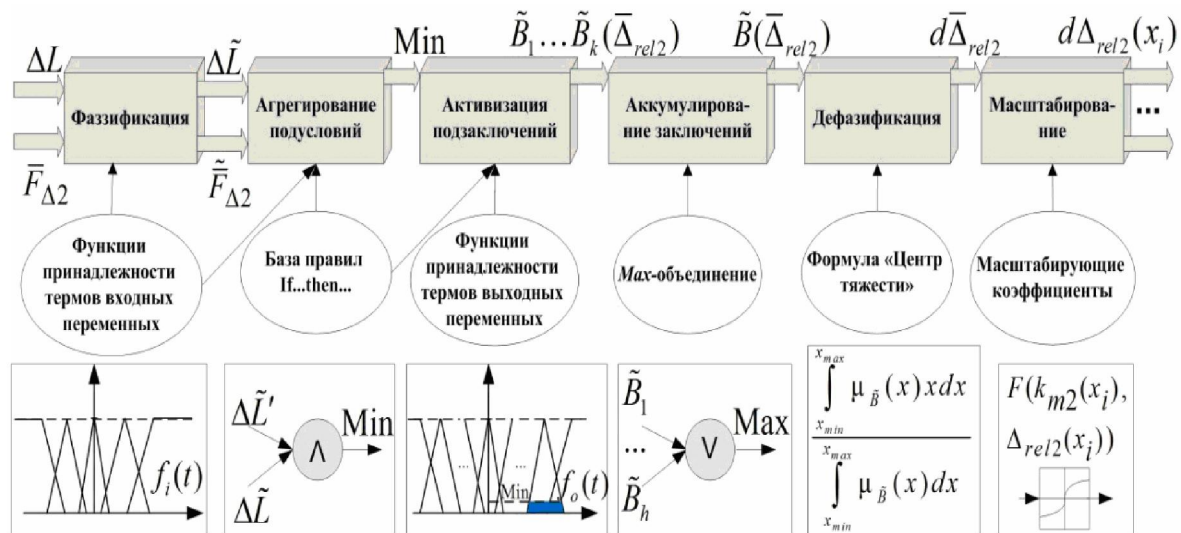


Рис. 5. Этапы формирования нечеткого вывода значений изменения апертур

Этап фаззификации предполагает преобразование четкого значения входной переменной в нечеткое множество входных лингвистических переменных. *Лингвистической переменной* [18] (*linguistic variable*) называется переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания некоторого естественного или искусственного языка (термы). Каждый терм формализуется нечетким множеством (функцией принадлежности). Например, для входной лингвистической переменной: *рассогласование с требуемым значением загрузки* – функция принадлежности ее термов (*отрицательная большая; отрицательная средняя; отрицательная малая; положительная малая; положительная средняя; положительная большая*) представлена на рисунке 6. В результате фаззификации определяются нечеткие величины входных переменных.

В классическом подходе [24] нечеткой логики решение задается пересечением нечетких множеств цели и ограничений. Поэтому при определении входных переменных необходимо учитывать (4), (5), (6). Дополнительно следует учитывать усредненные текущие размеры апертур параметров $x_i(t)$, причем взвешенные с использованием коэффициентов (2), (3). Это позволит учесть текущие значения апертур и динамику технологических процессов.

В качестве входных данных нечеткой системы определения $d\bar{\Delta}_{rel2}$ для выполнения главного критерия автором были выбраны такие параметры:

(А) величина рассогласования ΔL^j с допустимым значением L_{sub}^j , определяемая согласно (6);

(В) величина $\bar{F}_{\Delta 2} = \sum_{i=1}^n (\Delta_{rel2}(x_i)) / nk_{m2}(x_i)$, определяемая в соответствии с (3) и учитывающая размеры апертур второго уровня, а также динамику технологических процессов.

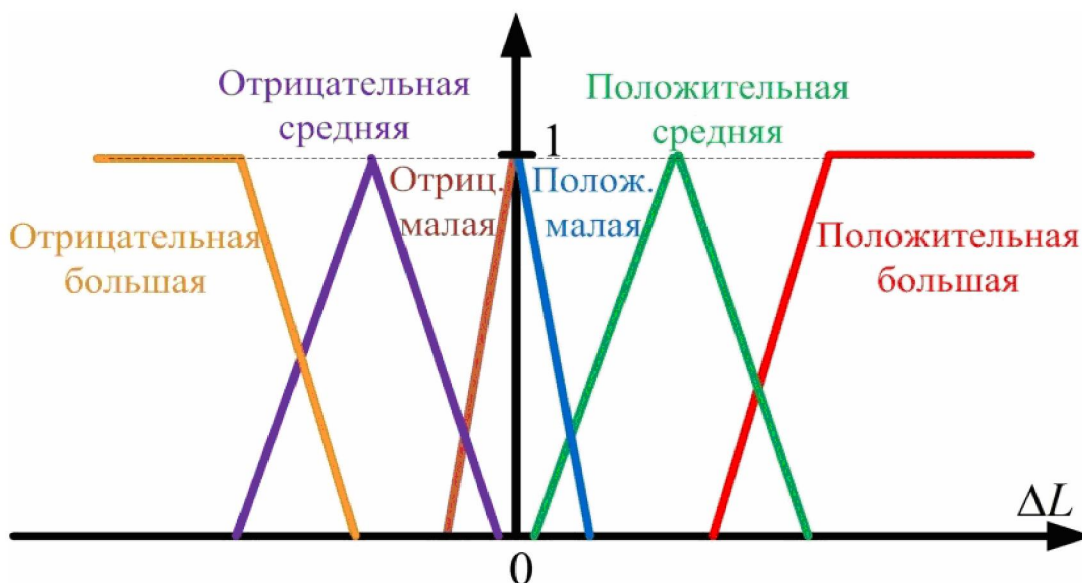


Рис. 6. Функция принадлежности термов $\Delta L(t)$

При определении $d\bar{\Delta}_{rel1}$ на основе уже установленного значения $\bar{\Delta}_{rel2}[mT]$ необходимо учитывать усредненную величину степени выполнения условия (7), определяемую выражением $\Delta\bar{z} = 1/n \times \sum_{i=1}^n (z_1(x_i)[mT-1] - z_2(x_i)[mT])$, где $[mT]$, $[mT-1]$ – текущий и предыдущий моменты времени, отражающие дискретность (с периодом T) выполнения алгоритма вычислительным устройством (контроллером).

Тогда в качестве входных данных нечеткой системы определения $d\bar{\Delta}_{rel1}$ автором предлагается использовать следующий набор показателей:

(1) величину рассогласования ΔL^j с допустимым значением L_{sub}^j , определяемую согласно (6);

(2) величину $\bar{F}_{\Delta 1} = \sum_{i=1}^n (\Delta_{rel1}(x_i)) / nk_{m1}(x_i)$, определяемую с учетом (2) и учитывающую размеры апертур первого уровня, а также динамику технологических процессов;

(3) величину $\Delta\bar{z}$, которая показывает усредненное значение разницы между значением $z_1(x_i)$ относительно величины $\Delta_2(x_i)$, определенной в предыдущий период $[mT-1]$, и значением $z_2(x_i)$ относительно величины $\Delta_2(x_i)$, уже определенной в текущий период $[mT]$.

На этапе *агрегирования подусловий* устанавливается мера истинности условий для каждого из правил нечеткой системы. Сформированная база правил необходима для формализации эмпирических знаний технологов, инженеров, операторов в виде *нечетких продукционных правил*. Она содержит знания экспертов (специалистов) о способах управления объектом в различных режимах, характере его функционирования в различных условиях.

Формально *нечеткое продукционное правило* – это выражение вида [12]:

$$(i), E, P, A \Rightarrow B, S, F, N,$$

где (i) – имя нечеткой продукции, E – сфера применения нечеткой продукции, P – условие применимости ядра нечеткой продукции, $A \Rightarrow B$ – ядро нечеткой продукции, в котором A – условие ядра (или антецедент), B – заключение ядра (или консеквент), \Rightarrow – знак логической секвенции или следования, S – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра (*метод активации*), F – коэффициент определенности или уверенности нечеткой продукции, N – постусловия продукции (действия, процедуры). Сфера применения нечеткой продукции E характеризует предметную часть знания. Условие применимости ядра продукции P содержит логическое выражение (предикат). Ядро $A \Rightarrow B$ является основной частью нечеткой базы правил. Нечеткие продукционные правила представляют собой *нечеткую продукционную систему* – относящийся к некоторой предметной области перечень правил «IF A THEN B», где антецеденты ядер правил нечеткой продукции построены при помощи логических связок «И», а консеквенты ядер правил нечеткой продукции простые. Агрегирование подусловий правил нечеткой продукции осуществляется при помощи классической нечеткой логической операции «И» элементарных высказываний $A_1, A_2 : T(A_1 \cap A_2) = \text{Min}\{T(A_1), T(A_2)\}$.

При *активизации подзаключений* результат вычисления степени истинности условий используется для определения нечетких значений подзаключений, составляющих консеквенты ядер продукционных правил. Активизация подзаключений нечеткой системы реализуется методом Min-активизации: $\mu(\gamma) = \text{Min}\{F; \mu(x)\}$, где $\mu(x)$ – функция принадлежности термов лингвистических переменных.

Аккумуляция заключений предполагает определение функции принадлежности выходных нечетких переменных. При этом происходит объединение результатов предыдущего этапа с целью вычисления функции принадлежности всех выходных переменных при помощи классического для нечеткой логики объединения функций принадлежности: $\mu(B_1 \cup B_2) = \text{Max}\{\mu(B_1); \mu(B_2)\}$.

При *дефаззификации* формируются четкие значения для каждой выходной переменной, которые используются внешними по отношению к системе нечеткого вывода процедурами – алгоритмом формирования блоков данных [4]. Вычисление количественных значений $d\bar{\Delta}_{rel1,2}$ выходных переменных на основании полученных в результате аккумуляции функций принадлежности $\mu\tilde{B}_{1,2}(x)$ производится методом центра тяжести [12]:

$$d\bar{\Delta}_{rel1,2} = \frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu\tilde{B}_{1,2}(x) x dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu\tilde{B}_{1,2}(x) dx},$$

где x_{\min}, x_{\max} – границы нечеткого множества соответствующей выходной лингвистической переменной.

На этапе *масштабирования* осуществляется переход от обобщенного значения апертуры соответствующего уровня к конкретным относительным значениям по каждому из параметров телеизмерения. В качестве масштабирующих коэффициентов необходимо использо-

вать поправочные функции, непосредственно учитывающие текущие значения размеров апертур и коэффициенты $k_{m1}(x_i)$, $k_{m2}(x_i)$ согласно (2), (3). Применение подобных масштабирующих коэффициентов позволит более «справедливо» распределять информационный ресурс с учетом текущих значений апертур и условий протекания технологических процессов. Масштабирующие коэффициенты в зависимости от знака изменения значений апертур $d\bar{\Delta}_{rel1,2}$ должны использоваться либо в числителе либо в знаменателе масштабирующего выражения. При определении апертур выражение масштабирования вычисляется по:

$$d\Delta_{rel1,2}(x_i) = \begin{cases} d\bar{\Delta}_{rel1,2} k_{m1,2}(x_i) (1 - \Delta_{rel1,2}(x_i)) d\bar{\Delta}_{rel1,2} \geq 0; \\ d\bar{\Delta}_{rel1,2} d\Delta_{rel1,2}(x_i) / k_{m1,2}(x_i) d\bar{\Delta}_{rel1,2} < 0. \end{cases}$$

После выполнения алгоритма Мамдани текущие относительные значения апертур определяются соотношением:

$$\Delta_{rel1(2)}(x_i)[mT] = \Delta_{rel1(2)}(x_i)[mT - 1] + d\Delta_{rel1(2)}(x_i)[mT].$$

Переход к абсолютным значениям апертур осуществляется по (1).

Вычислительные эксперименты и анализ их результатов. Целью экспериментов в конечном счете являлось сравнение характеристик обычного режима событийной (спорадической) передачи с фиксированной апертурой и режима блочной СПД на основе апертур двух уровней при заданных требованиях. Для этого было проведено моделирование работы в обоих режимах с использованием пакета MATLAB – на основе ретроспективных данных технологического процесса. Характеристики режима блочной СПД исследовались для таких вариантов: с динамическими значениями апертур и использованием алгоритма предложенного автором; со статическими значениями апертур.

Основные требования, предъявляемые к модели: (А) возможность исследовать на тестовой последовательности входных данных технологического процесса значение загруженности (на канальном уровне) информационного ресурса базовой станции и сравнить его с заданным рядом максимальных значений – 20, 40, 60 % (0,85; 1,71; 2,56 Мбит / с); (Б) возможность исследовать среднюю относительную погрешность отображения контролируемых параметров в диспетчерском пункте при значениях апертур измерений, указанных в таблице 1.

Разные требования к значению рекомендованной загруженности канала связи базовой станции могут определяться конфигурацией конкретного оборудования; особенностями реализованной сети связи; долей информационного ресурса, предоставленного для передачи технологических данных (с учетом необходимости передачи данных смежных систем по общему каналу – IP-телефонии, видеонаблюдения и т.д.). Поэтому анализ результатов должен отражать качество работы методов при различных ограничениях.

Начальные условия и допущения, принятые при исследовании модели. (1) На прикладном уровне используется событийный протокол IEC 60870-5-104 [6]. (2) На канальном уровне используется фрейм стандарта IEEE 802.11b [23]. (3) Скорость передачи заголовка канального уровня – 2 Мбит / с, данных более высоких уровней – 5,5 Мбит / с. (4) Загруженность сети связи не более допустимого значения предполагает обеспечение требуемых характеристик быстродействия. (5) Расчет учитывает только контролируемые данные, передающиеся со стороны удаленных объектов на диспетчерский пункт и не учитывает управляющие воздействия или дополнительные запросы, передаваемые с диспетчерского пункта. (6) Частота дискретизации обработки (обновления) измерений в контроллере – 100 с⁻¹; (7) Объектами контроля являются 15 площадок нефтяных скважин (по 205 объектов телеизмерений на каждой). (8) Коэффициенты $p(x_i)$ одинаковые для всех $x_i(t)$. (9) Функция $f(\eta)$ увеличивает масштабирующий коэффициент параметра $x_i(t)$ в 1,5 раза при значении теку-

шей скорости $x_i'(t)$, имеющей постоянный знак и устойчиво превышающей среднее значение скорости за период 1 с. (10) Структура блока данных прикладного уровня формируется в соответствии с рисунком 4.

В результате моделирования были определены характеристики исследуемых режимов передачи данных: среднее и максимальное значения загруженности информационного канала базовой станции; средняя относительная погрешность отображения контролируемых параметров в диспетчерском пункте (табл. 2). Средняя относительная погрешность отображения рассчитывалась с помощью усредненной разницы (ошибки) между значениями реального процесса и значениями величин, полученных на основе линейной аппроксимации данных в диспетчерском пункте.

Таблица 2

Характеристики режимов передачи данных по результатам моделирования

Режим передачи данных	Значение апертуры	Загруженность, Мбит/с		Средняя относительная погрешность отображения, %
		Максимальная	Средняя	
Обычный режим СПД при фиксированной апертуре	$S_{БД}$	216,8	19,51	0,02
	S_B	10,59	9,29	0,087
	$3 \times S_B$	3,96	3,19	0,14
	$5 \times S_B$	1,65	1,33	0,86
	δ	0,37	0,27	2,25
Режим блочной СПД при фиксированных апертурах	$S_B, S_{БД}$	2,022	0,34	0,02
Режим блочной СПД при динамическом установлении апертур (при загруженности до 20 %)	$S_B \dots \delta$, $S_{БД} \dots \delta$	0,85	0,32	0,028
Режим блочной СПД при динамическом установлении апертур (при загруженности до 40 %)	$S_B \dots \delta$, $S_{БД} \dots \delta$	1,71	0,33	0,02
Режим блочной СПД при динамическом установлении апертур (при загруженности до 60 %)	$S_B \dots \delta$, $S_{БД} \dots \delta$	2,02	0,34	0,02

Анализ результатов моделирования показал, что использование обычного режима СПД при фиксированных значениях апертур $S_{БД}$ или S_B приводит к существенному превышению максимального значения загруженности канала связи базовой станции. Уменьшение величины загруженности можно реализовать при увеличении значений апертур. Так целевые показатели загруженности 40 и 60 % можно обеспечить, например, при $\Delta = 5 \times S_B$, а показатель 20 % – при $\Delta = \delta$. Однако это повлечет уменьшение достоверности передачи данных при соответствующих средних значениях относительных погрешностей, равных 0,86 и 2,25 %. Режим блочной СПД при фиксированных апертурах значительно уменьшает объем передаваемых данных. Но при максимально точных значениях апертур этот режим не обеспечивает показатели загруженности в пределах 20 и 40 %. Режим блочной СПД при динамическом установлении величин апертур обеспечивает все заданные значения загруженности.

Причем при уменьшении целевого значения максимальной загруженности ресурса базовой станции средняя относительная погрешность отображения данных оставалась на низком уровне, близком к минимальному. На рисунке 7 показаны значения расхода воды в системе поддержания пластового давления (отражающие протекание реального процесса) и значения для сравнения, определяющие отображение процесса в диспетчерском пункте при различных режимах и параметрах передачи данных.

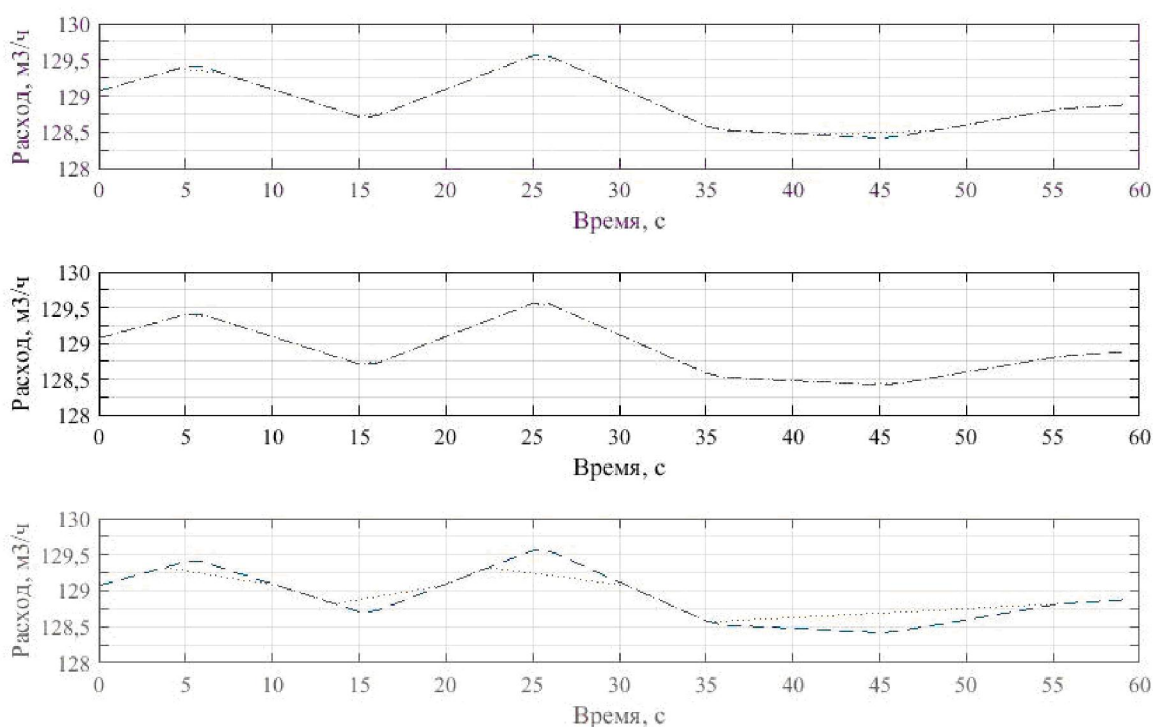


Рис. 7. Сравнение фактических значений расхода воды и результатов, отображаемых на диспетчерских мониторах в различных режимах передачи данных (линиями «- -» и «. .» изображены соответственно фактические и отображаемые значения)

Как видно из графиков, при обычных режимах СПД (верхний и нижний графики) на участках отклонения динамики процесса от линейной зависимости визуально наблюдается ошибка передачи данных, размер которой определяется величиной апертуры. Блочный режим передачи данных с динамическим определением апертур (средний график) позволяет реализовать отображение технологического процесса в диспетчерском пункте с высокой точностью. Визуализация точности отображения при обычном режиме с апертурой полностью аналогична среднему графику, а при блочных режимах с предельной загруженностью 20 и 40 % почти неразличима с ним (поэтому отдельно она не приводится).

Итак, сделаем выводы. 1. Для увеличения быстродействия системы диспетчерского управления распределенными объектами нефтедобычи целесообразно применение протоколов множественного доступа в режиме блочной СПД с динамическим установлением апертур телеизмерений. 2. При жестких ограничениях вычислительных ресурсов контроллеров для определения значений апертур в режиме реального времени целесообразнее использовать методологию нечеткого вывода. 3. Эффективность предложенного метода и разработанных алгоритмов определяется динамикой технологических процессов. Результаты моделирования в среде MATLAB на основании реальных ретроспективных данных показали, что

применение рассмотренной методологии в сочетании с инструментами нечеткой логики позволило обеспечить заданные значения загрузки – в отличие обычных режимов СПД. При этом достоверность формирования БД и наблюдаемость технологического процесса поддерживались на высоком уровне, близком к максимальному – что определяется минимальными значениями апертур.

Список литературы

1. Азизов Р. Ф. Определение оптимальных характеристик алгоритма конкурентного доступа к среде для минимизации времени передачи данных в децентрализованных беспроводных сетях / Р. Ф. Азизов, Д. А. Аминев, С. У. Увайсов, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1. – С. 139–145.
2. Белов С. П. О возможности повышения помехоустойчивости сигналов с OFDM / С. П. Белов, Д. И. Ушаков // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 6 (64). – С. 26–34.
3. Брумштейн Ю. М. ИКТ-компетентность стран, регионов, организаций и физических лиц: системный анализ целей, направлений и методов оценки / Ю. М. Брумштейн, А. Б. Кузьмина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2. – С. 47–63.
4. Зебзеев А. Г. Блочная спорадическая передача данных в системах телемеханики нефтегазодобычи / А. Г. Зебзеев / Тезисы доклада VIII Молодежной Региональной научно-технической конференции. – Томск : ОАО «ТомскНИПИнефть», 2015. – С. 134–136.
5. Зебзеев А. Г. Разработка карты применимости технологий связи для объектов нефтегазовой отрасли / А. Г. Зебзеев, Д. П. Стариков, Е. А. Рыбаков, А. Г. Чернов / Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 5 (37). – С. 19–22.
6. Золотарев С. В. Некоторые особенности реализации стандарта IEC-60870-5-104 в системе программирования контроллеров ISaGRAF: от теории к практике / С. В. Золотарев // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2010. – № 4 (28). – Режим доступа: <http://isup.ru/articles/4/618/> (дата обращения 05.07.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Зяблов Д. С. Электротехнические свойства диапазонов радиоспектра в беспроводных сетях передачи данных / Д. С. Зяблов / Индустрия сервиса в XXI веке : материалы 5-й Международной конференции. – Москва : Московский государственный университет сервиса, 2003. – С. 157–162.
8. Катыгин Б. Г. Алгоритм управления параметрами протокола случайного множественного доступа для повышения коэффициента использования пропускной способности канала сети широкополосного беспроводного доступа / Б. Г. Катыгин // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 2 (21). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/17TVN214.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
9. Климов И. З. Методика формирования ансамблей широкополосных сигналов для увеличения скорости передачи информации / И. З. Климов, А. Н. Копысов, А. М. Чувашов / Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике : труды III Всероссийской научной конференции. – Муром, 2010. – С. 208–213.
10. Колбанов М. О. Модели и методы оценки характеристик обработки информации в интеллектуальных сетях связи / М. О. Колбанов, С. Л. Яковлев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет, 2002. – 288 с.
11. Крейнделин В. Б. Квазиоптимальный алгоритм демодуляции в системах с пространственно-временным кодированием / В. Б. Крейнделин, Л. А. Варукина // Радиотехника. – 2009. – № 4. – С. 11–15.
12. Рубанов В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления нечеткое управление в технических системах / В. Г. Рубанов, А. Г. Филатов, И. А. Рыбин // Электронное пособие. – Режим доступа: <http://nrsu.bstu.ru/> (дата обращения 07.07.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
13. Система телемеханики. Техническое описание. – ООО «Синтек», 2015. – 10 с. – Режим доступа: http://www.sintek-nn.ru/docs/sistematm_15.05.2015.pdf (дата обращения 05.07.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. Стандарт Компании ОАО «НК «Роснефть» № ПЗ-04 СД-0038. Автоматизированные системы управления технологическими процессами нефтегазодобычи. Требования к функциональным характеристикам. – 2014. – 163 с.
15. Тимошук Р. С. Оценка влияния корреляции в системах радиосвязи с множественной передачей по технологии MISO / Р. С. Тимошук // Информатика и проблемы телекоммуникаций : мате-

риалы Российской научно-технической конференции. – Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2013. – Т. 1. – С. 135.

16. Умняшкин С. В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов / С. В. Умняшкин. – Москва : ИНФРА-М, 2009. – 304 с.

17. Чернолучский И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Чернолучский. – Санкт-Петербург : Питер, 2005. – 416 с.

18. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – Москва: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.

19. Bevin D. Modbus и DNP3: Сравнение эффективности коммуникаций. Обзорная статья / D. Bevin. – Control Microsystems Inc., 2009. – 7 с.

20. Bryan William Plass. Greater sustained throughput and contention elimination in IEEE 802.11 with DS-CDMA/ Bryan William Plass // A thesis submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. – 2011. – 68 p.

21. Chen Li. Multi-input–Multi-output (MIMO) Control System Performance Monitoring Based on Dissimilarity Analysis / Chen Li, Biao Huang, Da Zheng, Feng Qian // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2014. – № 53 (47). – P. 18226–18235.

22. Haley D. Iterative encoding of low-density parity-check codes / D. Haley, A. Gran, J. Buetefuer // Proceedings, IEEE Globecom. – October 2002. – P. 2016–2036.

23. Mohand Yazid. Modeling and enhancement of the IEEE 802.11 RTS / CTS scheme in an error-prone channel / Mohand Yazid, Djamil Aissani, Louiza Bouallouche-Medjkoune, Nassim Amrouche, Kamel Bakli // Formal Aspects of Computing. – 2015. – P. 33–52.

24. Zadeh L. A. Toward a Theory of Fuzzy Systems. Aspect Network and System Theory / L. A. Zadeh // Rinehart and Winston. – 1971.

References

1. Azizov R. F., Aminev D. A., Uvaysov S. U., Yurkov N. K. Opredelenie optimalnykh kharakteristik algoritma konkurentnogo dostupa k srede dlya minimizatsii vremeni peredachi dannykh v detsentralizovannykh besprovodnykh setyakh [Determination of optimal performance of the algorithm concurrent access to the medium to minimize the time of data transmission in wireless networks decentralized]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 1, pp. 139–145.

2. Belov S. P., Ushakov D. I. O vozmozhnosti povysheniya pomekhoustoychivosti signalov s OFDM [On the possibility of increasing the noise immunity of signals with OFDM]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technology], 2011, no. 6 (64), pp. 26–34.

3. Brumshteyn Yu. M., Kuzmina A. B. IKT-kompetentnost stran, regionov, organizatsiy i fizicheskikh lits: sistemnyy analiz tseley, napravleniy i metodov otsenki [ICT competence of countries, regions, organizations and individuals: systematic analysis of the objectives, directions and methods of evaluation]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 2, pp. 47–63.

4. Zebzeev A. G. Blochnaya sporadicheskaya peredacha dannykh v sistemakh telemekhaniki neftegazodobychi [Block sporadic data transmission systems of remote control of oil and gas]. *Tezisy doklada VIII Molodezhnoy Regionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the VIII Regional Youth Scientific and Technical Conference], Tomsk, OAO «TomskNIPIneft» Publ., 2015, pp. 134–136.

5. Zebzeev A. G., Starikov D. P., Rybakov Ye. A., Chernov A. G. Razrabotka karty primenimosti tekhnologii svyazi dlya obektov neftegazovoy otrasli [The development of communication technologies applicable card for the oil and gas industry]. *Ekspozitsiya Neft Gaz* [Exposition Oil Gas], 2014, no. 5 (37), pp. 19–22.

6. Zolotarev S. V. Nekotorye osobennosti realizatsii standarta IEC-60870-5-104 v sisteme programmirovaniya kontrollerov ISaGRAF: ot teorii k praktike [Some features of the implementation of the standard IEC-60870-5-104 system controller programming ISaGRAF: from theory to practice]. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti* [Computerization and Control System in the Industry], 2010, no. 4. Available at: <http://nrsu.bstu.ru/articles/4/618/> (accessed: 05.07.2015).

7. Zyablov D. S. Elektrotekhnicheskie svoystva diapazonov radiospektra v besprovodnykh setyakh peredachi dannykh [Electrical properties of bands of the radio spectrum for wireless data networks]. *Indus-*

trija servisa v XXI veke : materialy 5-y Mezhdunarodnoy konferentsii [Service Industry in the XXI century. Proceedings of the 5th International Conference], Moscow, Moscow State University of Service Publ. House, 2003, pp. 157–162.

8. Katygin B. G. Algoritm upravleniya parametrami protokola sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa dlya povysheniya koeffitsienta ispolzovaniya propusknoy sposobnosti kanala seti shirokopolosnogo besprovodnogo dostupa [Control algorithm parameters random multiple access protocol to increase the utilization rate of bandwidth broadband wireless access], *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet Journal "Sociology of Science"], 2014, no. 2 (21). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/17TVN214.pdf>.

9. Klimov I. Z., Kopysov A. N., Chuvashov A. M. Metodika formirovaniya ansambley shirokopolosnykh signalov dlya uvelicheniya skorosti peredachi informatsii [Methodology of ensembles broadband signals to increase the speed of information transfer]. *Sverkhshirokopolosnye signaly v radiolokatsii, svyazi i akustike : trudy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [UWB Signals in Radar, Communications and Acoustics. Proceedings of the III All-Russian Scientific Conference], Murom, 2010, pp. 208–213.

10. Kolbanov M. O., Yakovlev S. L. Modeli i metody otsenki kharakteristik obrabotki informatsii v intellektualnykh setyakh svyazi [Models and methods for evaluating the characteristics of information processing in intelligent communication networks]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Publ. House, 2002. 288 p.

11. Kreyndelin V. B., Varukina L. A. Kvazioptimalnyy algoritm demodulyatsii v sistemakh s prostanstvenno-vremennym kodirovaniem [Quasioptimal demodulation algorithm in systems with space-time coding]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2009, no. 4, pp. 11–15.

12. Rubanov V. G., Filatov A. G., Rybin I. A. Intellektualnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Intelligent automatic control system. fuzzy control in technical systems]. Elektronnoe posobie [Electronic Manual]. Available at: <http://nrsu.bstu.ru/> (accessed: 07.07.2015).

13. *Sistema telemekhaniki. Tekhnicheskoe opisanie* [The system of remote control. Technical description], ООО «Синтек» Publ., 2015. 10 p. Available at: http://www.sintek-nn.ru/docs/sistematm_15.05.2015.pdf (accessed: 05.07.2015).

14. Standard of JSC "NK" Rosneft» no. P3-04 DM-0038. Automated process control system for oil and gas. Requirements to functional characteristics. 2014. 163 p.

15. Timoshchuk R. S. Otsenka vliyaniya korrelyatsii v sistemakh radiosvyazi s mnozhestvennoy peredachey po tekhnologii MISO [Assessing the impact of correlations in systems with multiple radio transmission technology MISO]. *Informatika i problemy telekommunikatsiy : materialy Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Computers and Telecommunications Issues. Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference], Novosibirsk, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences Publ. House, 2013, vol. 1, pp. 135.

16. Umnyashkin S. V. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoy obrabotki i predstavleniya signalov* [Theoretical Foundations of digital signal processing and reporting], Moscow INFRA-M Publ., 2009. 304 p.

17. Chernorutskiy I. G. *Metody prinyatiya resheniy* [Decision-making methods], Saint Petersburg, Piter Publ., 2005. 416 p.

18. Shtovba S. D. Proektirovanie nechetkih system sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems by means of MATLAB], Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007. 288 p.

19. Bevin D. *Modbus i DNP3: Sravnenie effektivnosti kommunikatsiy. Obzornaya statya* [Modbus and DNP3: Comparing effectiveness of communication. Reviews], Control Microsystems Inc., 2009. 7 p.

20. Bryan William Plass. Greater sustained throughput and contention elimination in IEEE 802.11 with DS-CDMA/ Bryan William Plass. *A thesis submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science*, 2011. 68 p.

21. Chen Li, Biao Huang, Da Zheng, Feng Qian Multi-input–Multi-output (MIMO) Control System Performance Monitoring Based on Dissimilarity Analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014., no. 53 (47), pp. 18226–18235.

22. Haley D., Gran A., Buetefer J. Iterative encoding of low-density parity-check codes. *Proceedings, IEEE Globecom*, October 2002, pp. 2016–2036.

23. Mohand Yazid, Djamil Aïssani, Louiza Bouallouche-Medjkoune, Nassim Amrouche, Kamel Bakli. Modeling and enhancement of the IEEE 802.11 RTS / CTS scheme in an error-prone channel. *Formal Aspects of Computing*, 2015, pp. 33–52.

24. Zadeh L. A. *Toward a Theory of Fuzzy Systems. Aspect Network and System Theory. Rinehart and Winston*, 1971.