

УДК 004.75

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-4-26-38>

## Модели взаимодействия элементов подсистемы управления, мониторинга и диагностики сетей передачи данных автоматизированных систем управления

**А. В. Гаврилов, В. И. Фрейман**✉

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

✉ [vifrejman@pstu.ru](mailto:vifrejman@pstu.ru)

### Аннотация.

*Цель работы:* улучшение эксплуатационно-технических характеристик сетей передачи данных (СПД) автоматизированных систем управления (АСУ) на основе структурно-параметрического подхода к построению и реализации подсистемы управления, мониторинга и диагностики (УМД) технологического и коммуникационного оборудования.

*Материалы и методы.* Предлагается структурно-параметрический подход к построению подсистемы УМД, который позволит улучшить количественные и качественные показатели функционирования СПД в структуре распределенных АСУ. Структурный компонент подразумевает выбор архитектуры и топологии (точка подключения, уровни и алгоритмы обмена информацией, размеры контролируемых зон (кластеров) и т. д.) наложенной сети, обеспечивающей взаимодействие управляющих, коммуникационных и терминальных устройств. Параметрический компонент определяет анализ и настройку параметров элементов и протоколов взаимодействия между ними, которые обеспечат заданные показатели работы СПД в составе АСУ. Предложены математические модели для определения временных параметров функционирования подсистемы УМД в зависимости от их характеристик (масштаба, топологии, быстродействия, трафика и т. п.). Разработаны и исследованы программные модели, которые могут быть использованы в качестве инструментария для решения задач синтеза и анализа подсистемы УМД СПД АСУ.

*Результаты.* Получены математические модели, которые позволяют выбрать архитектуру и параметры подсистемы УМД для заданных характеристик СПД АСУ. Созданы программные модели, реализующие предложенный структурно-параметрический подход с учетом требований и исходных данных. Приведены сведения об апробации разработанных моделей.

*Заключение.* Полученные результаты могут быть использованы для улучшения эксплуатационно-технических характеристик СПД АСУ за счет обоснованного выбора структуры подсистемы УМД для разных вариантов технологий взаимодействия и сетевых протоколов.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, сеть передачи данных, подсистема управления, мониторинга и диагностики, протокол, топология, опрос, событие, период, модель

**Для цитирования:** Гаврилов А. В., Фрейман В. И. Модели взаимодействия элементов подсистемы управления, мониторинга и диагностики сетей передачи данных автоматизированных систем управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 26–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-26-38.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Авторы выражают признательность профессору Ефиму Львовичу Кону за приобщение к научной тематике.

## Models of Control, Monitoring and Diagnostics Subsystem Elements Interconnection of Automation Control Systems Data Transmission Networks

A. V. Gavrilov, V. I. Freyman✉

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russia

✉ vifrejman@pstu.ru

### Abstract.

*The purpose of the work:* improving the operational and technical characteristics of data transmission networks (DTN) of automated control systems (ACS) based on the structural-parametric approach to the construction and implementation of the subsystem of control, monitoring and diagnostics (CMD) of technological and communication equipment.

*Materials and methods.* A structural-parametric approach to the construction of the CMD subsystem is proposed, which will improve the quantitative and qualitative indicators of the DTN functioning in the structure of distributed ACS. The structural component implies the choice of architecture and topology (connection point, levels and algorithms for information exchange, sizes of controlled zones (clusters), etc.) of the superimposed network that ensures the interaction of control, communication and terminal devices. The parametric component determines the analysis and configuration of the parameters of the elements and the protocols of interaction between them, which will ensure the specified performance indicators of the DTN as part of the ACS. Mathematical models for determining the time parameters of the CMD subsystem functioning depending on their characteristics (scale, topology, performance, traffic, etc.) are proposed. Software models that can be used as a tool for solving problems of synthesis and analysis of the CMD subsystem of the DTN ACS are developed and studied.

*Results.* Mathematical models are obtained that allow selecting the architecture and parameters of the CMD subsystem for the specified characteristics of the DTN ACS. Software models are created that implement the proposed structural-parametric approach, taking into account the requirements and initial data. Information on testing the developed models is provided.

*Conclusion.* The obtained results can be used to improve the operational and technical characteristics of the DTN ACS due to the justified choice of the CMD subsystem structure for different options of interaction technologies and network protocols.

**Keywords:** automated control system, data transmission network, control, monitoring and diagnostics subsystem, protocol, topology, polling, event, period, model

**For citation:** Gavrilov A. V., Freyman V. I. Models of Control, Monitoring and Diagnostics Subsystem Elements Interconnection of Automation Control Systems Data Transmission Networks // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 26–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-26-38.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Gratitude.** The authors would like to thank Professor Yefim Lvovich Kohn for introducing them to scientific topics.

**Введение.** Автоматизированные системы управления (АСУ) позволяют эффективно и надежно функционировать современным предприятиям и организациям в различных сферах деятельности: производственной, финансовой, социальной, медицинской и т. п. [1]. Их широкое распространение обуславливает необходимость обеспечивать многофункциональность решаемых технических и организационных задач. Это сопровождается потребностью формирования, передачи и обработки огромных информационных потоков (сете-

вого трафика) [2]. Следовательно, от количественных (например, скорость) и качественных (достоверность, целостность, периодичность поступления, задержка и т. п.) показателей доставки информации зависят эффективность и результативность решения профильных задач АСУ [3].

Задачи обеспечения обмена информацией между компонентами АСУ решают сети передачи данных (СПД). Они выполняют функцию коммуникационной платформы АСУ, по которой циркулирует информация различного характера (опера-

тивно-технологическая, общетехническая, организационная, конфигурационная, мониторинговая, диагностическая и т. д.) [4]. К основным компонентам СПД относятся коммуникационное оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы, модемы, мультиплексоры), терминальные устройства (измерительные преобразователи, исполнительные элементы, контроллеры, компьютеры, сервера). Достоверность процесса обмена информацией определяется надежностью функционирования элементов СПД и каналов связи между ними [5].

Надежность СПД во многом зависит от эффективности организации процесса эксплуатации [6]. На этом, наиболее протяженном, этапе жизненного цикла основным инструментом обеспечения надежности функционирования СПД служит ее основная обеспечивающая подсистема – подсистема управления, мониторинга и диагностики (УМД) [7].

Основные процессы подсистемы УМД [8]:

– управление: настройка и оперативное изменение конфигурационных параметров оборудования [9];

– мониторинг: постоянный оценочный контроль технического состояния оборудования [10];

– диагностика: детализированное (углубленное) определение технического состояния с целью поиска и локализации неисправности, как правило, с полным или частичным выводом объекта из эксплуатации [11].

Современные подсистемы УМД в большинстве своем имеют клиент-серверную архитектуру и строятся по принципу «агент–менеджер» [12]. В роли агента выступает аппаратно-программное обеспечение объекта контроля, а в качестве менеджера – аппаратно-программное обеспечение управляющего элемента, иницирующего все основные процессы УМД [13]. По сути, подсистема УМД представляет собой наложенную сеть передачи и обработки данных, которая в качестве транспортных технологий использует реализованные в СПД сетевые протоколы (например, Ethernet, IP, TCP и т. п.), а поверх них – специализированные протоколы (например, SNMP) [14].

Компоненты СПД – это сложные (многопараметрические) и многофункциональные устройства, а сами сети имеют многоуровневую архитектуру и многосвязные топологии [15], поэтому задача повышения надежности функционирования СПД всегда остается актуальной [16]. Она может быть решена с учетом следующих основных показателей надежности:

– корректное конфигурирование параметров коммуникационного и терминального оборудования;

– оперативное изменение параметров коммуникационного и терминального оборудования (например, для задействования резервных каналов связи);

– сбор, анализ и обработка мониторинговой информации;

– прогноз деградации параметров и предотвращение выхода оборудования из строя, выявление первопричины возникновения аварийной ситуации.

Способы повышения ремонтпригодности (восстанавливаемости):

– сбор, анализ и обработка диагностической информации – локализация места и характера возникновения неисправностей;

– формирование рекомендаций для замены узлов отказавшего оборудования.

Одним из наиболее результативных путей реализации рассматриваемых способов повышения показателей надежности СПД АСУ представляется улучшение эффективности подсистемы УМД [17]. Под эффективностью будем понимать улучшение ее характеристик – надежности получения информации, времени обнаружения аварийной ситуации, точности локализации места и характера неисправности, полноты диагностических тестов и т. п.

Общая цель исследований, проводимых авторами, – повысить эксплуатационно-технические характеристики СПД в структуре АСУ за счет улучшения эффективности функционирования подсистемы УМД. Общая задача исследований – сформировать эффективную структуру УМД, обеспечить эффективные механизмы взаимодействия элементов и выбрать параметры сетевых протоколов подсистемы УМД СПД АСУ [18].

Объект исследования – СПД АСУ. Предмет исследования – модели и методы построения УМД СПД АСУ.

В настоящей статье выберем в качестве объекта исследования процесс мониторинга, поскольку он занимает наиболее длительную часть эксплуатации и, следовательно, его показатели во многом определяют эксплуатационно-технические характеристики функционирования СПД АСУ.

**Постановка задачи.** В процессе мониторинга технического состояния объектов реализуются два режима взаимодействия – запрос–ответ (инициатива управляющего устройства) и событие–подтверждение (инициатива контролируемого

устройства) [19], [20]. Основным режимом, как правило, выбирается *опрос* и его вариации (циклический, групповой, выборочный и т. п.) [21], [22]. Основным его параметром служит *период опроса*. Он определяет время появления информации о неисправности объекта контроля у управляющего элемента для информирования персонала и принятия решения по устранению [23]. Для повышения эффективности функционирования важно выбрать необходимые и достаточные значения параметров опроса (алгоритм, способ формирования запросов, периодичность, время ожидания ответа, количество перезапросов и т. д.) [24], [25]. Для этого необходимо построить и исследовать математические и программные модели, которые позволят оценить выполнение системой заданных требований, а также сформировать рекомендации по настройке параметров управляющих, коммуникационных и терминальных элементов СПД АСУ.

*Исходные данные:* топология и характеристики элементов СПД АСУ и протоколов их взаимодействия.

*Требования:* показатели надежности, временные характеристики (max, min, mean периода опроса, время реакции (ответа), доступность).

Цель статьи – разработка и исследование моделей взаимодействия элементов подсистемы УМД СПД АСУ.

Объект исследования – подсистема УМД СПД АСУ.

Предмет исследования – математические и программные модели взаимодействия управляющих, коммуникационных и терминальных сетевых элементов.

Задачи статьи:

1. Построить математические модели оценки временных характеристик опроса технического состояния сетевых элементов.

2. Реализовать программную модель оценки временных характеристик опроса состояния сетевых элементов.

3. Сделать выводы и рекомендации к практическому применению разработанных моделей.

4. Оценить применимость предложенных моделей к разным топологиям СПД АСУ.

5. Оценить применимость предложенных моделей к разным технологиям СПД АСУ.

6. Провести экспериментальные исследования разработанных моделей.

7. Определить направление дальнейших исследований.

**Математическая модель для расчета временных параметров процедуры циклического опроса.** Построим граф, иллюстрирующий процедуру опроса  $N$ -го сетевого элемента (СЭ) менеджером в точке подключения  $H$  (рис. 1).

Условные обозначения:

$H$  – начало опроса;

$t_{ф.з}$  – время формирования запроса менеджером;

$t_{о.о}$  – время обработки ответа менеджером;

$t_{о.з}$  – время обработки запроса агентом;

$t_{ф.о}$  – время формирования ответа агентом;

$t_{п.з}$  – время передачи запроса между соседними сетевыми элементами;

$t_{п.о}$  – время передачи ответа между соседними сетевыми элементами;

$t_o$  – время обработки в промежуточных сетевых элементах (не связано с обработкой запроса).

Временные характеристики формирования запроса и обработки ответа менеджером или агентом, а также время обработки в промежуточных сетевых элементах, зависят от объема информации и производительности соответствующего устройства. Объем информации определяется используемым стеком сетевых протоколов от физического до прикладного уровней модели взаимодействия открытых систем (OSI). Например, стек может быть реализован следующим образом:

1, 2 – Ethernet;  
3 – IP;  
4 – TCP или UDP;  
7 – SNMP.

В данном примере (при запросе одной переменной SNMP) объем передаваемой информации и, соответственно, время передачи и запроса, а также ответа будет примерно одинаковым (при условии использования одной и той же коммуни-

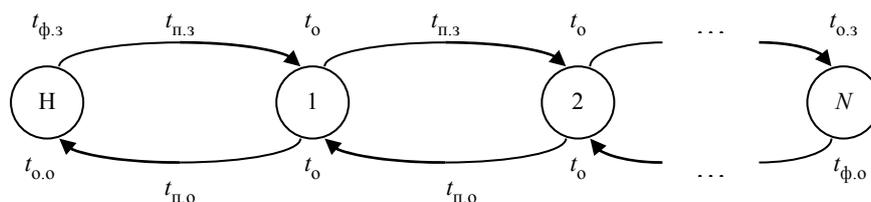


Рис. 1. Иллюстрация процедуры циклического опроса и его временных параметров  
Fig. 1. The Illustration of the cyclic polling procedure and its timing parameters

кационной технологии и наличии пропускной способности для передачи без существенных задержек). В дальнейшем это допущение позволит упростить и математическую, и программную модели без значимой потери точности расчетов.

Примем, что все СЭ «идеальны», т. е. находятся в состоянии готовности (работоспособности). Тогда формула для расчета времени опроса СЭ с произвольным номером ( $t_i$ ) может быть представлена следующим образом:

$$t_i = t_{\phi.з} + t_{o.o} + t_{o.з} + t_{\phi.o} + i(t_{п.з} + t_{п.o} + t_o).$$

Следовательно, минимальное время одного цикла опроса  $T_{ц}$  (когда работоспособны все СЭ) определяется так:

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^N t_i = N(t_{\phi.з} + t_{o.o} + t_{o.з} + t_{\phi.o}) + \sum_{i=1}^N i(t_{п.з} + t_{п.o} + t_o) = N(t_{\phi.з} + t_{o.o} + t_{o.з} + t_{\phi.o}) + (t_{п.з} + t_{п.o} + t_o) \frac{(1+N)N}{2} = N \left[ t_{\phi.з} + t_{o.o} + t_{o.з} + t_{\phi.o} + (t_{п.з} + t_{п.o} + t_o) \frac{1+N}{2} \right].$$

Определить характер зависимости времени цикла опроса от параметров можно через частные производные, например

$$\frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{\phi.з}} = \frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{o.o}} = \frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{o.з}} = \frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{\phi.o}} = N;$$

$$\frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{п.з}} = \frac{\partial T_{ц}}{\partial t_{п.o}} = \frac{\partial T_{ц}}{\partial t_o} = \frac{(1+N)N}{2};$$

$$\frac{\partial T_{ц}}{\partial N} = t_{\phi.з} + t_{o.o} + t_{o.з} + t_{\phi.o} + (t_{п.з} + t_{п.o} + t_o) \left( \frac{1+2N}{2} \right).$$

С учетом полученных выражений можно оценить изменение времени опроса при изменении составляющих параметров.

**Математическая модель для определения временных параметров циклического опроса с учетом места подключения менеджера.** Доработаем предложенную модель с учетом места подключения управляющего элемента (менеджера) к одному из сетевых элементов. Рассмотрим сначала линейную (магистральную) топологию сети, а потом распространим полученные результаты на другие виды сетевых структур.

Построим схему, иллюстрирующую подключение устройства управления (менеджера) в произвольной точке системы передачи (рис. 2).

Исходные данные и ограничения:

- линейная структура;
- $N$  – количество сетевых элементов;
- $M \in [1; N]$  – точка подключения менеджера.

Временные параметры:

- $t_{п.м}$  – время передачи от/к менеджеру (F-интерфейс рекомендации TMN);
- $t_{п.с}$  – время передачи между сетевыми элементами (Q3-интерфейс рекомендации TMN);
- $t_m$  – время формирования обработки запроса и обработки ответа менеджером в устройстве управления;
- $t_a$  – время обработки запроса и формирования ответа агентом в СЭ.

Примем, что все СЭ «идеальны», т. е. находятся в состоянии готовности (работоспособности). Тогда формула для расчета времени опроса СЭ с произвольным номером ( $t_k$ , где  $k$  – расстояние до точки подключения менеджера) может быть представлена следующим образом:

$$t(k) = 2t_{п.м} + t_m + t_a + 2k(t_{п.с} + t_o).$$

Следовательно, минимальное время одного цикла опроса  $T_{ц}$  (когда работоспособны все СЭ) определяется следующим образом:

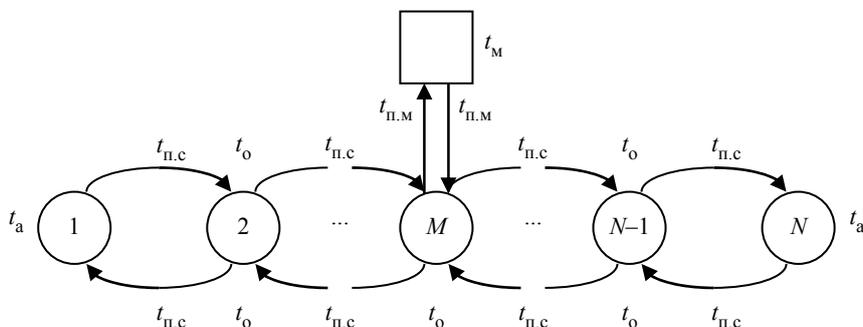


Рис. 2. Граф опроса с учетом места подключения менеджера  
 Fig. 2. A survey graph that takes into account the location of the manager's connection point

$$\begin{aligned}
 T_{Ц} &= \sum_{i=0}^{M-1} t(i) + \sum_{j=1}^{N-M} t(j) = M(2t_{п.м} + t_m + t_a) + \\
 &+ \sum_{i=0}^{M-1} 2i(t_{п.с} + t_o) + (N-M)(2t_{п.м} + t_m + t_a) + \\
 &+ \sum_{j=1}^{N-M} 2j(t_{п.с} + t_o) = N(2t_{п.м} + t_m + t_a) + \\
 &+ 2(t_{п.с} + t_o) \left[ \frac{(M-1)M}{2} + \frac{(N-M)(N-M+1)}{2} \right] = \\
 &= N(2t_{п.м} + t_m + t_a) + (t_{п.с} + t_o) \times \\
 &\times [M^2 - M + N^2 - 2NM + M^2 + N - M] = \\
 &= N(2t_{п.м} + t_m + t_a) + (t_{п.с} + t_o) \times \\
 &\times [2M^2 - 2M + N^2 - 2NM + N].
 \end{aligned}$$

В формуле параметр  $i$  показывает «расстояние» от точки подключения менеджера до сетевого элемента «слева» (условно в сторону убывания порядковых номеров), а  $j$  – «расстояние» от точки подключения менеджера до сетевого элемента «справа» (условно в сторону возрастания порядковых номеров).

В общем случае (например, при топологиях типа «дерево», «снежинка», «ячейка») может быть рассмотрен только один параметр, относительно которого оценивается указанное «расстояние». При этом могут быть проанализированы как полный, так и упрощенный варианты расчета времени цикла опроса. Более того, для разных участков сети могут быть использованы разные технологии связи с разными пропускными способностями. В этом случае общая формула для разных сегментов сети «собирается» вручную.

При помощи частных производных (пример приведен в предыдущем разделе) можно определить характер изменения времени цикла опроса при изменении временных и структурных параметров системы.

Упростим модель, приняв время обработки существенно меньше времени передачи, что вполне адекватно для высокопроизводительных устройств, к коим относятся современные компоненты сетей передачи и обработки, а также хранения данных (коммутаторы, маршрутизаторы, мультиплексоры, серверы, компьютеры и пр.):

$$t_m, t_a, t_o \ll t_{п.м}, t_{п.с},$$

$$\text{тогда } T(k) = 2t_{п.м} + 2kt_{п.с}.$$

Рассмотрим еще один частный случай, характерный для линейной топологии или сведенной к

ней. В нем параметры  $i$  и  $j$  можно рассматривать как порядковые номера сетевых элементов, пронумерованных слева направо,  $M$  – номер сетевого элемента, к которому подключен менеджер,  $N$  – количество сетевых элементов в «линейке». Тогда формула имеет вид

$$\begin{aligned}
 T_{Ц} &= \sum_{i=1}^M t(i) + \sum_{j=M+1}^N t(j); \\
 t(i) &= 2t_{п.м} + 2(M-i)t_{п.с}; \\
 t(j) &= 2t_{п.м} + 2(j-M)t_{п.с}.
 \end{aligned}$$

В результате получим:

$$\begin{aligned}
 T_{Ц} &= \sum_{i=1}^M [2t_{п.м} + 2(M-i)t_{п.с}] + \\
 &+ \sum_{j=M+1}^N [2t_{п.м} + 2(j-M)t_{п.с}] = \\
 &= 2Nt_{п.м} + (2M^2 + N^2 + N - 2M - 2NM)t_{п.с}.
 \end{aligned}$$

**Математическая модель для определения временных параметров циклического опроса с учетом отсутствия ответов и повторных запросов.** Для «реальных» СЭ есть вероятность того, что они не успевают ответить на запрос или транслировать ответ, а также возможны потери информации при передаче. Поэтому в модель вводится параметр времени ожидания  $t_i^*$ , причем для успешного приема ответа должно выполняться условие  $t_i^* > t_i$ .

Рассмотрим граничное (не отвечает ни один СЭ) и промежуточное (успешно завершился опрос  $M$  СЭ из  $N$ ) условия для определения времени цикла опроса реальных СЭ:

$$T_{Ц \max} = \sum_{i=1}^N t_i^*; \quad T_{Ц} = \sum_{i=1}^M t_i + \sum_{i=1}^{N-M} t_i^*.$$

Усложним модель, введя многократные запросы СЭ за один цикл с параметром  $k$  – количество запросов. Тогда время запроса для произвольного СЭ  $T_i$  будет определяться количеством запросов  $l$  ( $1 \leq l \leq k$ ), количеством запросов без ответа  $l^*$ , тайм-аутом ожидания ответа  $t_i^*$  и временем успешного запроса  $t_i$ :

$$T_i = l^* t_i^* + (l - l^*) t_i = l^* (t_i^* - t_i) + l t_i,$$

где  $l = l^* + 1$ , если последний запрос в серии из  $l$  был успешным;  $l = l^*$ , если ни на один запрос из  $k$  не было ответа,  $l \in [1; k]$ .

Следовательно, время цикла определяется так:

$$T_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^N T_i.$$

Повторные запросы могут быть в одном цикле опроса или по одному в каждом цикле. Таким образом, решение о том, что сетевой элемент не отвечает, принимается в случае, когда на  $k$  запросов подряд (в одном цикле или в  $k$  последовательно идущих циклах) отсутствует ответ на запрос.

**Описание программной модели определения временных параметров опроса.** Для анализа временных характеристик процедуры циклического опроса при решении задач управления, мониторинга и диагностики сетевых элементов СПД АСУ разработана программа имитационного моделирования. Она позволяет выполнить расчеты по предложенным моделям и получить информацию для анализа различных ситуаций.

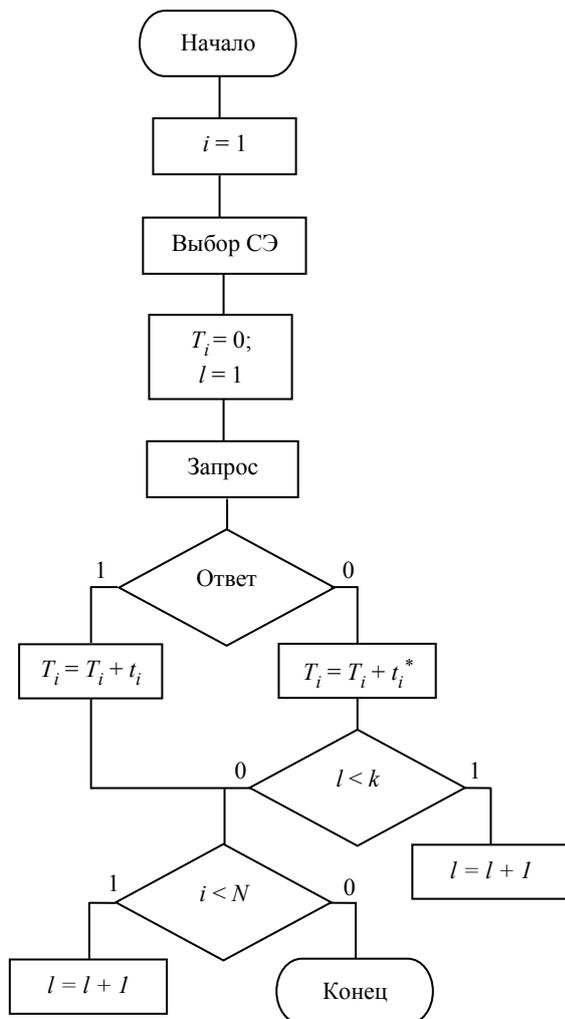


Рис. 3. Алгоритм определения времени ответа одного СЭ  
Fig. 3. The algorithm for determining network element response time

Алгоритм определения времени ответа одного СЭ в рамках цикла опроса представлен на рис. 3.

Далее нужно ввести в модель вероятностные показатели. Это зависит от модели отказов и т. п.

Первая модель отказов – если не ответил с первого раза, то это означает, что СЭ неисправен или сеть нарушена (отказ). Вторая модель отказов – если не ответил, то это сбой (передачи, обработки и т. п.), поэтому вероятность ответа на следующем запросе увеличивается ( $p(l+1) > p(l)$ ). От выбора модели зависят коэффициенты при введенных временных параметрах. Правильность выбора коэффициентов и значений временных параметров устанавливается соответствием результатов аналитического и имитационного моделирования.

В качестве среды разработки выбран программный инструментальный Visual Basic for Application для приложения Microsoft Excel. Это объясняется тем, что он позволяет реализовать расчет по предложенным формулам, получить результаты и представить их в удобном для дальнейшей обработки формате (таблицы, графики).

**Анализ применимости предложенных моделей для разных топологий и технологий СПД.** Топология «линия» («магистраль», «кольцо»). Характерна для транспортных технологий передачи данных для распределенных вычислительных сетей или АСУ ТП. В качестве примера можно привести технологии плездохронной (PDH) и синхронной (SDH) цифровых иерархий, беспроводной связи (WiMAX, Wi-Fi, радиорелейные линии – РРЛ), «полевые» (fieldbus) технологии (ModBus, ProfiBus, CAN и т. д.). Оценка временных показателей опроса проводится способом, предложенным в предыдущем разделе.

**Топология «звезда».** Применяется для технологий вычислительных сетей, например Ethernet, в типовом (Telecommunication) и промышленном (Industrial) исполнении. В данном случае менеджер подключен к центральному сетевому элементу,  $N$  периферийных подключенных сетевых элементов:

$$T_{\text{ц}} = 2t_{\text{п.м}} + \sum_{i=1}^N [2t_{\text{п.м}} + 2t_{\text{п.с}}] = 2t_{\text{п.м}} + 2Nt_{\text{п.м}} + 2Nt_{\text{п.с}} = 2t_{\text{п.м}}(N+1) + 2Nt_{\text{п.с}}.$$

Развитием служит топология «снежинка», для которой сетевые элементы группируются в кластеры. Каждый из них представляет собой соединение типа «звезда», со своим управляющим элементом – локальным менеджером. Центральный менеджер имеет каналы связи до всех

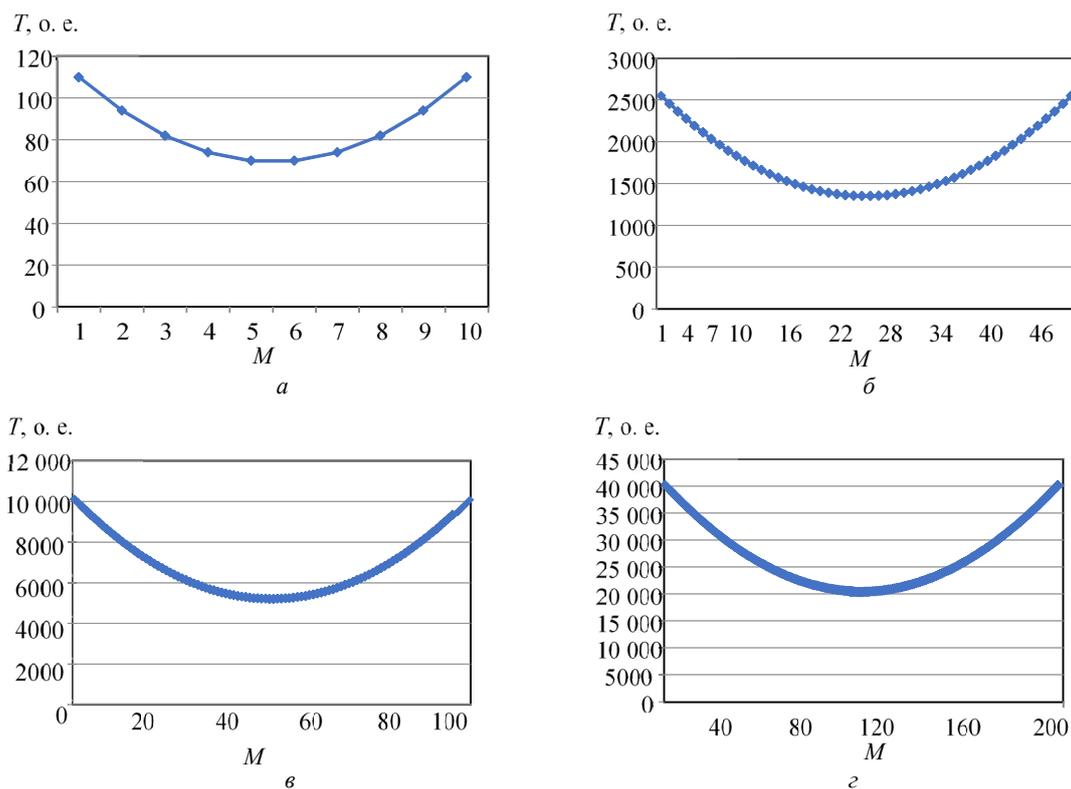


Рис. 4. Зависимость времени цикла опроса от места подключения менеджера при разном количестве сетевых элементов:  $N = 10$  (а),  $N = 50$  (б),  $N = 100$  (в),  $N = 200$  (г)  
 Fig. 4. Dependence of the polling cycle time on the location of the manager connection with different amount of network elements:  $N = 10$  (a),  $N = 50$  (б),  $N = 100$  (в),  $N = 200$  (г)

локальных менеджеров. Общий цикл опроса формируется из циклов опроса в каждом кластере. При этом формируется многоуровневая система взаимодействия управляющих элементов, проектирование и исследование которой является одной из задач дальнейших исследований авторов.

**Топология «дерево».** Применяется для многоуровневых сетей передачи данных, например построенных на разных уровнях цифровой иерархии (основная высокоскоростная магистраль (Ethernet, SDH, PPL), к которой подключаются менее скоростные сегменты (Ethernet)). В рассматриваемой ситуации применяется общий подход, при этом количество СЭ «справа» и «слева» от менеджера и пути опроса формируются вручную.

**Топология «ячейка».** Используется в беспроводных сетях передачи данных с динамически изменяемой структурой (AdHoc, Mesh). Как правило, описывается моделью прямоугольной матрицы размером  $N \times M$ . Если площадь покрытия сигналом допускает путь только по горизонтали и вертикали, то максимальный путь  $L_{\max}$  (из одного «угла» в противоположный) определяется так:

$$L_{\max} = N + M - 2.$$

Если допускается путь по горизонтали, вертикали и диагонали, то максимальный путь  $L_{\max}$  определяется так:

$$L_{\max} = \min\{N, M\} + |N - M|.$$

Период опроса рассчитывается по предложенной методике.

**Описание экспериментов по определению временных параметров опроса.** В процессе экспериментов используются разработанные математические модели и реализованная на их основе программная модель, описанные в предыдущих разделах. Для оценки качественного характера зависимостей временные параметры передачи оцениваются в «условных единицах» и принимаются равными 1. Соответственно, и время цикла тоже будет измерено в «относительных единицах». Количественные параметры ( $M, N$ ) измеряются в единицах.

1. Зависимость времени цикла опроса от места подключения менеджера:  $T_{\text{ц}} = f(M) | N = \text{const}, t = \text{const}$  (рис. 4).

Зависимость имеет параболический характер, важный ее параметр «размах» параболы:

$$\Delta = T_{\max} - T_{\min}.$$

Введем функцию «чувствительности» времени опроса к месту подключения менеджера, которая может определяться через отношение «размаха» к максимальному или среднему времени опроса:

$$K_{\max} = \Delta/T_{\max}; K_{\text{cp}} = \Delta/T_{\text{cp}}.$$

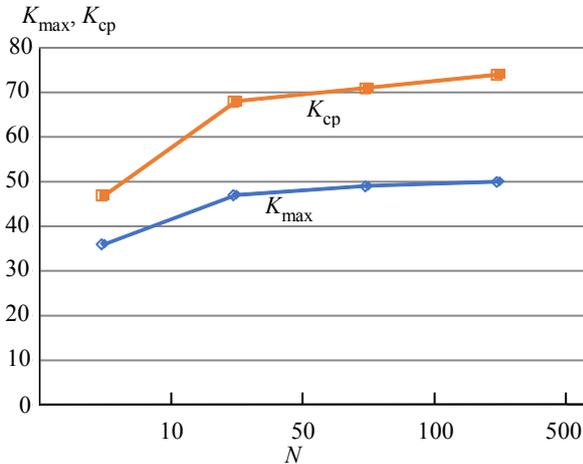


Рис. 5. Зависимость времени цикла опроса от размеров сети  
Fig. 5. Dependence of sensitivity indicators on the network size

На рис. 5. приведены результаты моделирования для СПД разных размеров. Они позволяют оценить динамику изменения характеристик (при фиксированных временных параметрах).

2. Зависимость времени опроса от количества сетевых элементов:  $T_{\text{ц}} = f(N)|_{M = \text{const}, t = \text{const}}$  (рис. 6).

Для оценки возьмем несколько значений точек подключения менеджера из единого ряда:  $\{1, [N/4], [N/2]\}$ , где  $[ ]$  – операция округления. Очевидно, что относительно середины значения будут симметричны.

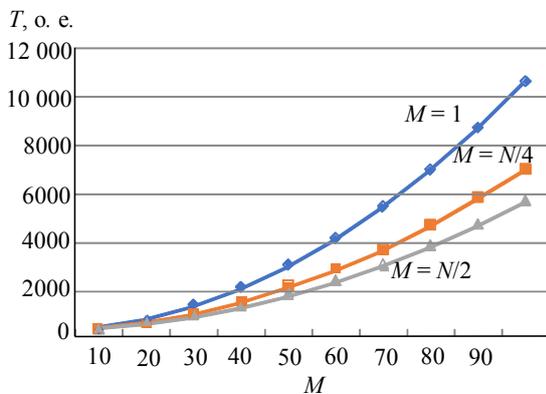


Рис. 6. Зависимость показателей чувствительности от размеров сети  
Fig. 6. Dependence of the polling cycle time on the network size

3. Скорость изменения времени цикла опроса при изменении количества сетевых элементов (рис. 7)

$$\frac{\partial T_{\text{ц}}}{\partial N} = 2t_{\text{п.м}} + (2N - 2M + 1)t_{\text{п.с}}. \quad (1)$$

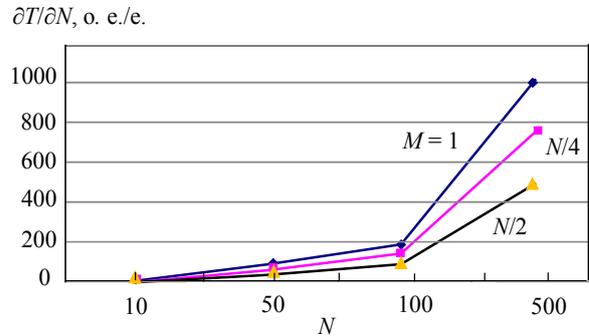


Рис. 7. Зависимость скорости изменения времени цикла опроса от количества сетевых элементов  
Fig. 7. Dependence of the polling cycle time rate change on the number of network elements

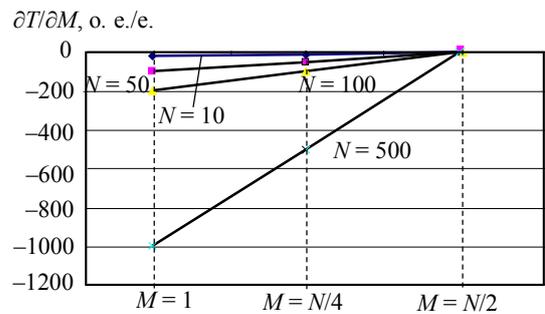


Рис. 8. Зависимость скорости изменения времени цикла опроса от места подключения менеджера  
Fig. 8. Dependence of the polling cycle time rate change on the manager connection point

4. Зависимость скорости изменения времени цикла опроса при изменении места подключения менеджера (рис. 8)

$$\frac{\partial T_{\text{ц}}}{\partial M} = (4M - 2N - 2)t_{\text{п.с}}. \quad (2)$$

### Обсуждение результатов.

Анализ зависимости показателей чувствительности от места подключения управляющего элемента (рис. 5):

1. Чем больше размах, тем больше функция «чувствительности» периода опроса к месту подключения.

2.  $T \rightarrow \min$ , если  $M \rightarrow [N/2]$ , где  $[ ]$  – операция округления.

3. Чем больше  $N$ , тем больше «размах» относительно максимального и среднего значений периода опроса, т. е. больше чувствительность к месту подключения менеджера.

4. Чем больше  $N$ , тем медленнее увеличивается «чувствительность» времени цикла опроса к месту подключения менеджера.

5. При малых значениях  $N$  выбор места подключения менеджера не так сильно влияет на параметры опроса, как при больших значениях.

**Анализ зависимости показателей чувствительности от количества СЭ (рис. 6).** Чем ближе к началу (или к концу) линии точка подключения менеджера, тем быстрее увеличивается период опроса с увеличением количества сетевых элементов, поэтому располагать точки подключения менеджера лучше ближе к середине линии.

**Анализ скорости изменения времени цикла опроса от количества СЭ (рис. 7):**

1. Скорость находится в прямой зависимости от количества сетевых элементов  $N$  и в обратной – от места подключения менеджера  $M$ .

2. Чем место подключения менеджера ближе к середине, тем скорость растет медленнее.

Полученное выражение (1) может быть использовано для решения прямой и обратной задач анализа:

1. Определить, как изменится время цикла опроса, если задать изменение количества сетевых элементов (например, увеличить в 2 раза, в 10 раз, на заданную величину).

2. Определить, как можно преобразовать количество сетевых элементов, если время цикла опроса необходимо изменить на заданное значение.

Анализ скорости изменения времени цикла опроса от места подключения менеджера (рис. 8):

1. Скорость находится в прямой зависимости от места подключения менеджера  $M$  и в обратной – от количества сетевых элементов  $N$ .

2. Чем больше  $N$ , тем быстрее уменьшается скорость.

3. При подключении менеджера в середине линии скорость минимальна.

Полученное выражение (2) может быть использовано для решения прямой и обратной задач анализа:

1. Определить, как изменится время цикла опроса, если сместить точку подключения менеджера на заданное значение.

2. Определить, как можно сместить точку подключения менеджера, если время цикла опроса необходимо изменить на заданное значение.

**Выводы и заключение.** В статье представлены результаты исследований, проводимых авторами с целью улучшения эксплуатационно-технических характеристик СПД АСУ. Это реализуется за счет корректного выбора временных параметров режима опроса при мониторинге технического состояния оборудования при помощи аппаратно-программных средств подсистемы УМД.

Построены и проанализированы математические модели оценки временных характеристик опроса состояния сетевых элементов. Они позволяют учесть не только характеристики производительности самих устройств и параметры сетевых протоколов, но и точки подключения управляющих устройств, а также модель отказов при передаче сообщений.

Реализована программная модель оценки временных характеристик опроса состояния сетевых элементов, построенная на предложенных математических моделях. Она позволяет рассчитать временные параметры опроса, а также получить их количественные и качественные оценки.

Выполнена оценка применимости предложенных математических и программных моделей к разным технологиям и топологиям СПД АСУ, показаны особенности использования и адаптации для наиболее часто используемых вариантов в СПД АСУ.

Проведены экспериментальные исследования разработанных моделей, получены качественные зависимости, которые позволили сделать выводы и на их основе – практические рекомендации по конфигурации подсистемы УМД.

Определены направления дальнейших исследований, которые ориентированы на развитие структурно-параметрического подхода к проектированию подсистемы УМД. В частности, речь идет о построении и исследовании иерархических структур, а также об адаптивном конфигурировании параметров сетевых протоколов для эффективного функционирования подсистемы УМД с учетом внешних условий («плавающий» характер сетевого трафика, изменение топологии СПД, отказы и т. п.).

#### Список литературы

1. Корнеев П. Е. Совершенствование передачи цифровых данных в автоматизированных системах управления технологическими процессами с учетом фактора удаленности производства // Вестн. МГТУ «Станкин». 2024. № 3 (70). С. 104–113.

2. Москвин А. А., Данилов В. П. Особенности моделирования информационного обмена в базовом сегменте иерархической сети при различном качестве каналов передачи данных // Изв. Ин-та инженерной физики. 2022. № 1 (63). С. 48–53.

3. Гаврилов А. В., Кон Е. Л., Фрейман В. И. К вопросу об управлении распределенными гетерогенными мультивендорными инфокоммуникационными системами // Вестн. ПермГТУ. Электротехника, информ. технол., системы управления. 2011. № 5. С. 264–270.
4. Comprehensive evaluation of network performance monitoring solutions / S. Juneja, S. Maiti, S. Raweri, B. S. Bhati, H. Sharma // 2024 Int. Conf. on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS), Gurugram, India. 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/ISCS61804.2024.10581356.
5. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга / В. А. Шевцов, А. М. Казанцев, А. В. Тимошенко, Р. А. Кочкаров, С. В. Прокопчина // Вестн. Воронежского ГТУ. 2024. Т. 20. № 2. С. 124–131. doi: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019.
6. Умарова Д. М., Суиндыкова Э. А. Методика оценки эффективности системы мониторинга по времени реакции на инциденты сети передачи данных // Молодой ученый. 2017. № 23 (157). С. 173–175.
7. Карачанская Е. В., Любомский С. А. Анализ российского рынка программных продуктов мониторинга сетей передачи данных // Автоматизация в промышленности. 2024. № 8. С. 28–31. doi: 10.25728/avtprom.2024.08.06.
8. Системы мониторинга для сетей передачи данных / А. А. Лапцевич, А. О. Дубченко, С. Л. Федоров // Современные средства связи. 2020. № 1. С. 178–179.
9. Суиндыкова Э. А., Пищин О. Н. Исследование эффективности систем мониторинга при управлении сетью передачи данных // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 25–3. С. 24–27. doi: 10.18411/lj-30-04-2017-3-06.
10. Авилов М. И., Шичкина Ю. А., Куприянов М. С. Мониторинг информационно-коммуникационной компьютерной сети с применением модуля дополнительной диагностики // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 5. С. 34–45.
11. Фрейман В. И. Методы обработки и количественной оценки результатов диагностирования элементов систем управления распределенными инфраструктурами // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 1. С. 83–94.
12. Многоагентная динамическая модель многокритериального информационного взаимодействия структурных элементов самоорганизующейся сети передачи данных наземно-воздушной системы мониторинга / В. В. Бородин, Д. А. Клецков, А. В. Тимошенко, В. А. Щевцов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2023. № 1. С. 123–136. doi: 10.31857/S0002338822060051.
13. Мультиформальный подход к построению систем мониторинга / А. И. Водяхо, Н. А. Жукова, С. А. Аббас, М. А. Червонцев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 7. С. 5–13.
14. Фрейман В. И., Гаврилов А. В. Взаимодействие элементов иерархических информационно-вычислительных систем // Вестн. Перм НППУ. Электротехника, информ. технол., системы управления. 2024. № 49. С. 40–60. doi: 10.15593/2224-9397/2024.1.03.
15. Jan F., Mathieu B., Meddour D.-E. A monitoring tool for Wireless Multi-hop Mesh Networks // IEEE Network Operations and Management Symp., Salvador, Brazil. 2008. P. 587–601. doi: 10.1109/NOMS.2008.4575180.
16. Bezukladnikov I. I., Gavrilov A. V. Problem of network monitoring in distributed wireless sensor networks // Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW 2016). 2016. P. 146–150. doi: 10.1109/ElConRusNW.2016.7448141.
17. Алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга / Р. А. Кочкаров, М. Т. Балдычев, А. М. Казанцев, С. В. Прокопчина, А. В. Тимошенко // Тр. МАИ. 2024. № 137. С. 1–27.
18. Gavrilov A. V., Kavalerov M. V. Mobile ad hoc network management and routing efficiency // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus 2022). IEEE, 2022. P. 27–30. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755752.
19. Performance analysis of gated service polling system based on two-level priority / X. Li, L. Bao, H. Ding, X. Ding // 2023 4<sup>th</sup> Inf. Commun. Technol. Conf. (ICTC), Nanjing, China. 2023. P. 289–293. doi: 10.1109/ICTC57116.2023.10154630.
20. Абрамов Г. В., Глушаков В. Е. Модель системы мониторинга передачи данных в гибридных сетях // Вестн. Воронежского ин-та ФСИН России. 2024. № 3. С. 14–21.
21. Siddiqui S., Ghani S. Towards dynamic polling: Survey and analysis of Channel Polling mechanisms for Wireless Sensor Networks // 2016 Intern. Conf. on Intelligent Systems Engin. (ICISE), Islamabad, Pakistan. 2016. P. 356–363. doi: 10.1109/INTELSE.2016.7475149.
22. Сети передачи данных для мониторинга объектов инфраструктуры / Г. Ф. Насонов, Г. В. Осадчий, Д. В. Ефанов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 2. С. 5–8.
23. Ljubojević M., Bajić A., Mijić D. Centralized monitoring of computer networks using Zenoss open source platform // 2018 17<sup>th</sup> Int. Symp. INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/INFOTEH.2018.8345528.
24. A comparative study of deep neural network-aided canonical correlation analysis-based process monitoring and fault detection methods / Z. Chen, K. Liang, S. X. Ding, C. Yang, T. Peng, X. Yuan // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Syst. 2022. Vol. 33, no. 11. P. 6158–6172. doi: 10.1109/TNNLS.2021.3072491.
25. Research and application of cluster monitoring and management technology of the dispatching and control cloud based on hybrid architecture / S. Wu,

Y. Huang, L. Tao, W. Xia, Q. Yang, Y. Wang // 2022 IEEE 5<sup>th</sup> Advanced Inform. Management, Commun., Electronic and

Automation Control Conf. (IMCEC), Chongqing, China. 2022. P. 1650–1654. doi: 10.1109/IMCEC55388.2022.10019906.

### Информация об авторах

**Гаврилов Алексей Викторович** – ст. преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, д. 29, Пермь, 614990, Россия.  
E-mail: avgavrilov@pstu.ru

**Фрейман Владимир Исаакович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика». Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, д. 29, Пермь, 614990, Россия.  
E-mail: vifrejman@pstu.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-8492-8065>

### References

1. Korneev P. E. Sovershenstvovanie peredachi cifrovyykh dannykh v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya tehnologicheskimi processami s uchetom faktora udalennosti proizvodstva // Vestn. MGТУ «Stankin». 2024. № 3 (70). S. 104–113. (In Russ.).
2. Moskvina A. A., Danilov V. P. Osobennosti modelirovaniya informacionnogo obmena v bazovom segmente ierarhicheskoy seti pri razlichnom kachestve kanalov peredachi dannykh // Izv. In-ta inzhenernoj fiziki. 2022. № 1 (63). S. 48–53. (In Russ.).
3. Gavrilov A. V., Kon E. L., Frejman V. I. K voprosu ob upravlenii raspredelennymi geterogennymi mul'tivendornymi infokommunikacionnymi sistemami // Vestn. PermGTU. Jelektrotehnika, inform. tehnol., sistemy upravleniya. 2011. № 5. S. 264–270. (In Russ.).
4. Comprehensive evaluation of network performance monitoring solutions / S. Juneja, S. Maiti, S. Raweri, B. S. Bhati, H. Sharma // 2024 Int. Conf. on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS), Gurugram, India. 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/ISCS61804.2024.10581356.
5. Pokazatel' strukturnoj jeffektivnosti upravleniya informacionnym vzaimodejstviem v geterogennoj seti peredachi dannykh prostranstvenno-raspredelennoj sistemy monitoringa / V. A. Shevcov, A. M. Kazancev, A. V. Timoshenko, R. A. Kochkarov, S. V. Prokopchina // Vestn. Voronezhskogo GTU. 2024. T. 20. № 2. S. 124–131. doi: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019. (In Russ.).
6. Umarova D. M., Suindykova Je. A. Metodika ocenki jeffektivnosti sistemy monitoringa po vremeni reakcii na incidenty seti peredachi dannykh // Molodoj uchenyj. 2017. № 23 (157). S. 173–175. (In Russ.).
7. Karachanskaja E. V., Ljubomskij S. A. Analiz rossijskogo rynka programmnykh produktov monitoringa setej peredachi dannykh // Avtomatizacija v promyshlennosti. 2024. № 8. S. 28–31. doi: 10.25728/avtprom.2024.08.06. (In Russ.).
8. Sistemy monitoringa dlja setej peredachi dannykh / A. A. Lapcevich, A. O. Dubchenok, S. L. Fedorov // Sovremennye sredstva svyazi. 2020. № 1. S. 178–179. (In Russ.).
9. Suindykova Je. A., Pishhin O. N. Issledovanie jeffektivnosti sistem monitoringa pri upravlenii set'ju peredachi dannykh // Tendencii razvitija nauki i obrazovanija. 2017. № 25–3. S. 24–27. doi: 10.18411/lj-30-04-2017-3-06. (In Russ.).
10. Avilov M. I., Shichkina Ju. A., Kuprijanov M. S. Monitoring informacionno-kommunikacionnoj komp'juternoj seti s primeneniem modulja dopolnitel'noj diagnostiki // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2020. № 5. S. 34–45. (In Russ.).
11. Frejman V. I. Metody obrabotki i kolichestvennoj ocenki rezultatov diagnostirovaniya jelementov sistem upravleniya raspredelennymi infrastrukturalnymi // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 1. S. 83–94. (In Russ.).
12. Mnogoagentnaja dinamicheskaja model' mnogokriterial'nogo informacionnogo vzaimodejstviya strukturnyh jelementov samoorganizujushhejsja seti peredachi dannykh nazemno-vozdushnoj sistemy monitoringa / V. V. Borodin, D. A. Kleckov, A. V. Timoshenko, V. A. Shhevcov // Izv. RAN. Teorija i sistemy upravleniya. 2023. № 1. S. 123–136. doi: 10.31857/S0002338822060051. (In Russ.).
13. Mul'timodel'nyj podhod k postroeniju sistem monitoringa / A. I. Vodjaho, N. A. Zhukova, S. A. Abbas, M. A. Chervoncov // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 7. S. 5–13. (In Russ.).
14. Frejman V. I., Gavrilov A. V. Vzaimodejstvie jelementov ierarhicheskikh informacionno-vychislitel'nykh sistem // Vestn. Perm NIPU. Jelektrotehnika, inform. tehnol., sistemy upravleniya. 2024. № 49. S. 40–60. doi: 10.15593/2224-9397/2024.1.03. (In Russ.).
15. Jan F., Mathieu B., Meddour D.-E. A monitoring tool for Wireless Multihop Mesh Networks // IEEE Network Operations and Management Symp., Salvador, Brazil. 2008. P. 587–601. doi: 10.1109/NOMS.2008.4575180.
16. Bezukladnikov I. I., Gavrilov A. V. Problem of network monitoring in distributed wireless sensor networks // Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (EIconRusNW 2016). 2016. P. 146–150. doi: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448141.

17. Algoritm ocenki strukturno-funkcional'noj ustojchivosti i celostnosti geterogennoj seti peredachi dannyh prostranstvenno-raspredeljennoj sistemy monitoringa / R. A. Kochkarov, M. T. Baldychev, A. M. Kazancev, S. V. Prokopchina, A. V. Timoshenko // Tr. MAI. 2024. № 137. S. 1–27. (In Russ.).
18. Gavrilov A. V., Kavalero M. V. Mobile ad hoc network management and routing efficiency // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus 2022). IEEE, 2022. P. 27–30. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755752.
19. Performance analysis of gated service polling system based on two-level priority / X. Li, L. Bao, H. Ding, X. Ding // 2023 4<sup>th</sup> Inf. Commun. Technol. Conf. (ICTC), Nanjing, China. 2023. P. 289–293. doi: 10.1109/ICTC57116.2023.10154630.
20. Abramov G. V., Glushakov V. E. Model' sistemy monitoringa peredachi dannyh v gibridnyh setyah // Vestn. Voronezhskogo in-ta FSIN Rossii. 2024. № 3. S. 14–21. (In Russ.).
21. Siddiqui S., Ghani S. Towards dynamic polling: Survey and analysis of Channel Polling mechanisms for Wireless Sensor Networks // 2016 Intern. Conf. on Intelligent Systems Engin. (ICISE), Islamabad, Pakistan. 2016. P. 356–363. doi: 10.1109/INTELSE.2016.7475149.
22. Seti peredachi dannyh dlja monitoringa ob#ektov infrastruktury / G. F. Nasonov, G. V. Osadchij, D. V. Efanov, D. V. Sedyh // Avtomatika, svjaz', informatika. 2017. № 2. S. 5–8. (In Russ.).
23. Ljubojević M., Bajić A., Mijić D. Centralized monitoring of computer networks using Zenoss open source platform // 2018 17<sup>th</sup> Intern. Symp. INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/INFOTEH.2018.8345528.
24. A comparative study of deep neural network-aided canonical correlation analysis-based process monitoring and fault detection methods / Z. Chen, K. Liang, S. X. Ding, C. Yang, T. Peng, X. Yuan // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Syst. 2022. Vol. 33, no. 11. P. 6158–6172. doi: 10.1109/TNNLS.2021.3072491.
25. Research and application of cluster monitoring and management technology of the dispatching and control cloud based on hybrid architecture / S. Wu, Y. Huang, L. Tao, W. Xia, Q. Yang, Y. Wang // 2022 IEEE 5<sup>th</sup> Advanced Inform. Management, Commun., Electronic and Automation Control Conf. (IMCEC), Chongqing, China. 2022. P. 1650–1654. doi: 10.1109/IMCEC55388.2022.10019906.
- 

#### Information about the authors

**Alexey V. Gavrilov** – Assistant of Professor of Perm National Research Polytechnical University, Professor. Komsomolsky Prospekt, 29, Perm, 614990, Russia.  
E-mail: avgavrilov@pstu.ru

**Vladimir I. Freyman** – Dr Sci. (Eng.), Professor of Perm National Research Polytechnical University, Professor. Komsomolsky Prospekt, 29, Perm, 614990, Russia.  
E-mail: vifreyman@pstu.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-8492-8065>

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; принята к публикации после рецензирования 18.02.2025; опубликована онлайн 25.04.2025.

Submitted 10.01.2025; accepted 18.02.2025; published online 25.04.2025.

---