

Техническая диагностика и прогнозирование

УДК 625+681.518.5

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

ООО «ЛокоТех-Сигнал»,
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Российский университет транспорта

Г. В. Осадчий

ООО «НТЦ «Комплексные системы мониторинга»»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЧИСЛА ОБСЛУЖЕННЫХ ЗАЯВОК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ТЕСТА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА

В статье затрагивается проблема обеспечения тестирования самого ненадежного уровня современных систем внешнего технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики – уровня сбора диагностической информации измерительными контроллерами. Отмечается, что процедура самодиагностирования измерительных контроллеров систем мониторинга железнодорожной автоматики инициируется концентратором диагностической информации, к которому подключены измерительные контроллеры. От периода диагностирования, времени подачи теста и от множества тестовых комбинаций зависит своевременность идентификации нарушений в работе измерительных контроллеров. Предложено рассматривать задачу тестирования датчиков измерительных контроллеров как задачу обслуживания заявок в системе массового обслуживания. Все заявки разделены на две категории по приоритетам: первую составляют рабочие сигналы от объектов диагностирования (высокоприоритетные заявки), вторую – кодовые векторы диагностического теста (низкоприоритетные заявки). Заявкам от объектов диагностирования предоставляется абсолютный приоритет перед тестовой нагрузкой. В связи с этим разработан подход к определению среднего числа заявок диагностического теста при абсолютном приоритете, а также при относительном приоритете. Практической стороной полученного результата является возможность выбора наиболее эффективных временных интервалов подачи тестового воздействия на датчики измерительного контроллера системы мониторинга, а также выбор времени проведения процедуры тестирования.

системы технического диагностирования и мониторинга; измерительный контроллер; тестирование; отказоустойчивость; диагностический тест

Введение

Широкое распространение на транспорте и в промышленности получили средства встраиваемого и надстраиваемого технического диагностирования – это средства самодиагностирования блоков и компонентов, самопроверяемые схемы встроеного контроля, схемы сжатия и контроля сигналов, а также специализированные внешние средства автоматического измерения рабочих параметров технических объектов [1–11]. Подобные системы «вживляются» как в средства управления ответственными технологическими процессами, так и в технические сооружения инфраструктурного комплекса [12–16]. К примеру, с конца 90-х гг. XX в. по настоящее время на сети железных дорог Российской Федерации внедряются средства периодического и непрерывного мониторинга технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, позволяющие предупреждать развитие отказов и оптимизировать график процесса технического обслуживания объектов силами персонала дистанций сигнализации, централизации и блокировки [17]. Использование систем периодического и непрерывного мониторинга позволяет расширить реальное множество состояний объектов диагностирования [18] и за счет оперативного выявления предотказных работоспособных состояний [19] создавать предпосылки для повышения отказоустойчивости управляющих устройств.

Современные системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) строятся по единой концепции, предполагающей использование следующей организационной архитектуры [20]. На низовом уровне автоматики осуществляется сбор диагностической информации, ее некоторая предобработка, а затем передача в программное обеспечение концентратора диагностической информации. Эта задача реализуется в основном путем использования проводных интерфейсов передачи данных (только в последние годы разработчики стали использовать радиоканалы для решения некоторых частных задач доставки диагностических сообщений [21–24]). В концентраторе информации, располагаемом на посту электрической централизации на станции, осуществляется обработка данных и выдача результатов мониторинга пользователям. Кроме того, данные отправляются на более высокие уровни иерархии – в дистанцию сигнализации, централизации и блокировки, а также в ситуационные центры мониторинга [25].

От качества функционирования всех составляющих системы мониторинга зависят точность, достоверность и в конечном итоге эффективность процедуры технического диагностирования и прогнозирования изменений в рабочих параметрах устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Как показывает практика, наиболее уязвимыми с позиции надежности являются компоненты систем мониторинга низового уровня – измерительные контроллеры. По причине их отказов теряется диагностическая информация,

что приводит к остановке работы программных алгоритмов прогнозирования изменения рабочих параметров, в том числе упускаются важные детали, влияющие на достоверность прогноза. Все это влечет за собой снижение качества функционирования системы мониторинга в целом, появляются вопросы, касающиеся совершенствования сбора диагностической информации.

В данной работе авторы поднимают проблему организации уровня самодиагностирования в измерительных контроллерах на примере работы известной системы «Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» (АПК-ДК), разработанной на кафедре автоматики и телемеханики на железных дорогах Петербургского государственного университета путей сообщения в конце XX – начале XXI в. [26], развитию и совершенствованию технологий обработки данных в которой уделили не один год работы. От своевременности самодиагностирования, а также от множества проверяющих воздействий зависит корректность передаваемой в концентратор диагностической информации.

1 Задача самодиагностирования измерительных контроллеров мониторинга

При построении современных систем периодического и непрерывного мониторинга, таких, например, как АПК-ДК, необходимо решать задачу проверки правильности функционирования измерительных контроллеров системы. Это делается с помощью специально разработанных алгоритмов самодиагностирования, реализованных в программном обеспечении концентратора диагностической информации линейного поста мониторинга [27].

Задача анализа работы измерительных контроллеров с помощью программных средств концентратора распадается на подзадачи реализации процесса диагностирования контроллеров и обработки результатов диагностирования.

В свою очередь, задача реализации процесса диагностирования измерительных контроллеров состоит из следующих процедур:

- 1) выбора момента времени для проведения тестирования контроллера;
- 2) непосредственно процесса тестирования.

Рассмотрим решение первой задачи.

Диагностирование измерительного контроллера (подача на него проверяющего теста) влечет за собой отключение устройства от объектов диагностирования, т. е. на время тестирования информация с объектов, контролируемых этим устройством, будет потеряна. Это приводит к снижению качества информации, получаемой с объектов диагностирования. Поэтому появляется проблема выбора временного интервала для тестирования контроллера при условии максимально возможного сохранения качества информации.

Возможны два пути решения этой задачи.

Первый состоит в получении команды на проведение тестирования непосредственно от пользователя (ручной режим). К достоинствам этого метода можно отнести простоту реализации. К недостаткам – влияние «человеческого фактора» на качество получаемой от системы информации. Второй путь связан с использованием автоматического режима, когда решение о проведении тестирования принимается на основе информации, получаемой от объектов диагностирования.

При подаче команды на проведение сеанса диагностирования в так называемом ручном режиме необходимо предусмотреть возможность подачи этой команды на различных уровнях системы.

После принятия решения о возможности выделения времени для тестирования контроллера (для всех датчиков контроллера или его части) начинается сам процесс тестирования контроллера путем подачи теста на все входы или на часть входов. За один сеанс тестирования на входы могут быть поданы не все тестовые комбинации, а только их часть. Это связано с длительностью временного промежутка, выделяемого на проведение сеанса тестирования. Подготовка к подаче теста включает в себя логическое отключение тестируемых входов (датчиков) в программном обеспечении концентратора АПК-ДК. Подобная операция нужна для того, чтобы не рассматривать информацию от этих датчиков во время тестирования в качестве информации от объектов диагностирования (другими словами, чтобы не передавать в систему мониторинга ложного состояния объектов диагностирования). Датчики с точки зрения программного обеспечения могут быть установлены в неопределенное состояние или сохранять результат последнего получения диагностической информации. Физическое переключение (коммутация) линий связи между тестируемыми входами контроллера и контролируемыми объектами на источник подачи теста производится с помощью программно-управляемого коммутатора. Сама процедура тестирования заключается в подаче на входы измерительного контроллера теста и регистрации результатов состояний датчиков, получаемых от самого контроллера. Тестирование может быть прервано внешней командой при необходимости получения данных от тестируемых входов раньше, чем это было запланировано. Завершение тестирования происходит по алгоритму, противоположному подготовке к подаче теста.

Если за указанный цикл диагностирования тест подается только на часть входов измерительного контроллера или подается только часть тестовых комбинаций из запланированного набора (например, тестирование было прервано), то этот этап может отсутствовать. Тогда результаты тестирования сохраняются в накопительном буфере. Если же тестирование завершено, то производится сравнение результатов, полученных от контроллера с тестовым набором, в соответствии с заданными алгоритмами. По результатам

анализа делается вывод о состоянии элементов контроллера, которые были проверены. После этого сеанс тестирования завершается и программное обеспечение переходит к ожиданию нового промежутка времени для следующего сеанса тестирования.

Если в результате процедуры самодиагностирования был зафиксирован дефект измерительного контроллера, то в программном обеспечении АПК-ДК осуществляется парирование информации от отказавших датчиков или контроллера в целом (информация считается утерянной). Этим маскируются датчики для исключения передачи ложной информации в систему мониторинга. Кроме того, система индикацией в технологическом окне автоматизированного рабочего места предупреждает технолога о возникшем дефекте.

В [28] на примере известного измерительного контроллера ПИК-120 приводится методика тестирования измерительных контроллеров в системе АПК-ДК СТДМ. В частности, решена задача определения условий, при которых неисправность какого-либо датчика (она вызывает ложные искажения $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$) измерительного контроллера не будет обнаружена при тестировании. Показано, что ошибки на датчиках контроллера подчиняются простейшему потоку отказов, а значит, имеется некоторая аналогия решаемой задачи тестирования контроллеров с классической задачей анализа заявок на обслуживание абонентов автоматической телефонной станции [29].

2 Определение среднего числа обслуженных заявок диагностического теста в условиях абсолютного приоритета

Работа измерительного контроллера ПИК-120 в системе технического диагностирования и мониторинга представляет собой классическую систему массового обслуживания (М/М/1) (рис. 1) [30, 31]. Заявки, поступающие на объект технического диагностирования, состоят из двух частей:

– высокоприоритетной (рабочие сигналы от объектов диагностирования) с интенсивностью поступлений λ_1 и средним временем обслуживания $\frac{1}{\mu_1}$;

– низкоприоритетной (информационные кодовые векторы диагностического теста, позволяющие идентифицировать отказы дифференциальных входов устройства (константы «0» или «1»)) с интенсивностью поступлений λ_2 и средней продолжительностью обслуживания (опроса) $\frac{1}{\mu_2}$.

Рассматриваемая система является в общем случае одноканальной ($N = 1$), однако, если рассматривать случай, при котором процесс диагностирования позволяет опрашивать только часть входов (по группам), то система уже будет являться многоканальной. Расчет будет, естественно, иным, а для установления среднего времени ожидания заявок может быть применен метод из [32].

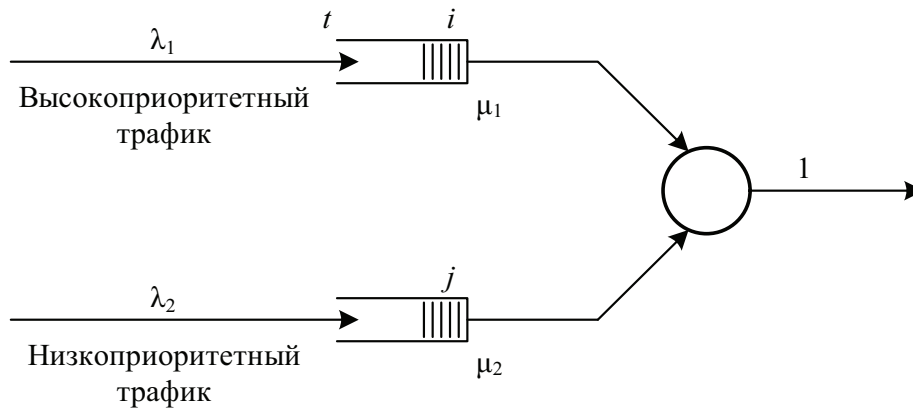


Рис. 1. Диаграмма состояний рассматриваемой системы

Заявкам от объектов диагностирования предоставляется абсолютный приоритет перед тестовой нагрузкой. Дополнительное условие для протокола: если поступающее высокоприоритетное сообщение (пакет) застаёт обслуживающее устройство занятым, оно вытесняет низкоприоритетное сообщение, которое находится на обслуживании. Это сообщение возвращается в очередь и ожидает в порядке поступления освобождения канала. При исследовании данной модели возможно использование методов декомпозиции, т. е. раздельное вычисление показателей обслуживания нагрузок. Таким образом, среднее число пакетов высокоприоритетного трафика в системе определяется величиной

$$E(i) = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1}.$$

Параметр $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$ – это интенсивность нагрузки, создаваемой поступающим (пуассоновским) потоком информационных сообщений с интенсивностью λ_1 при среднем времени обслуживания $\frac{1}{\mu_1}$.

Определение среднего числа пакетов низкоприоритетного трафика является гораздо более сложным и требующим составления системы уравнений равновесия и применения для ее решения производящих функций.

Система уравнений статистического равновесия, соответствующая диаграмме состояний (рис. 1), имеет вид

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p(0, j) = \lambda_2 p(0, j-1) + \mu_1 p(1, j) + \mu_2 p(0, j+1); \quad (1)$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p(i, j) = \mu_1 p(i+1, j) + \lambda_2 p(i, j-1) + \lambda_1 p(i-1, j), \quad (2)$$

с нормировочным условием

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) = 1. \quad (3)$$

Дополнительное уравнение, определяющее вероятность свободного состояния системы $p(0, 0)$:

$$(\lambda_1 + \lambda_2)p(0, 0) = \mu_1 p(1, 0) + \mu_2 p(0, 1).$$

В системах обслуживания, в которых допускаются бесконечные очереди, уравнения равновесия не так просто решаются рекуррентными методами. Поэтому приходится обращаться к производящим функциям, или методу преобразований. Равенства (1), (2) представляют собой пример разностных уравнений, которые возникают при описании процессов с дискретными параметрами. Применение метода преобразований дает возможность превратить разностное уравнение в алгебраическое, которое часто можно решить гораздо проще.

Производящая функция, или z -преобразование, применяемое в теории вероятностей, определяется в виде формулы [33]:

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n z^n. \quad (4)$$

Для решения системы разностных уравнений введем производящие функции:

$$\Phi_i(z_2) = \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) z_2^j; \quad (5)$$

$$\Phi_j(z_1) = \sum_{i=0}^{\infty} p(i, j) z_1^i. \quad (6)$$

Двойная производящая функция определяется равенством

$$\Phi(z_1, z_2) = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi_i(z_2) z_1^i = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) z_1^i z_2^j. \quad (7)$$

Эти ряды вследствие нормировочного условия $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) = \Phi(1, 1) = 1$ сходятся абсолютно (по крайней мере, в области $-1 \leq z_1, z_2 \leq 1$). Дифференцирование (7) по аргументу z_1 или z_2 позволяет определить среднее число пакетов в очереди, включая находящиеся на обслуживании, соответствующее высокоприоритетному и низкоприоритетному трафику. Таким образом, получаем

$$\frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} = \sum_{i=1}^{\infty} i \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) z_1^{i-1} z_2^j; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_2} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} j p(i, j) z_1^i z_2^{j-1}. \quad (9)$$

Среднее число пакетов высокоприоритетного трафика:

$$\left. \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right|_{z_1=1, z_2=1} = \sum_{i=0}^{\infty} i \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j). \quad (10)$$

Среднее число пакетов низкоприоритетного трафика:

$$\left. \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_2} \right|_{z_1=1, z_2=1} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} j p(i, j). \quad (11)$$

Умножая каждый член уравнения (2) на z_2^j , суммируя по всем значениям j , $j \geq 0$, и воспользовавшись равенством (5), получим

$$\begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) z_2^j &= \mu_1 \sum_{j=0}^{\infty} p(i+1, j) z_2^j + \lambda_2 \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j-1) z_2^j + \\ &+ \lambda_1 \sum_{j=0}^{\infty} p(i-1, j) z_2^j; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) \Phi_i(z_2) &= \mu_1 \Phi_{i+1}(z_2) + \lambda_2 z_2 \Phi_i(z_2) + \lambda_1 \Phi_{i-1}(z_2); \end{aligned}$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \Phi_i(z_2) = \mu_1 \Phi_{i+1}(z_2) + \lambda_1 \Phi_{i-1}(z_2). \quad (12)$$

Умножим выражение (12) на z_1^i и просуммируем по всем $i \geq 1$:

$$\begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(z_2) z_1^i &= \mu_1 \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{i+1}(z_2) z_1^i + \lambda_1 \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{i-1}(z_2) z_1^i; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \left[\sum_{i=0}^{\infty} \Phi_i(z_2) z_1^i - \Phi_0(z_2) \right] &= \\ = \mu_1 \frac{1}{z_1} \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{i+1}(z_2) z_1^{i+1} + \lambda_1 z_1 \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{i-1}(z_2) z_1^{i-1}; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \left[\Phi(z_1, z_2) - \Phi_0(z_2) \right] &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \mu_1 \frac{1}{z_1} [\Phi(z_1, z_2) - \Phi_0(z_2) - z_1 \Phi_1(z_2)] + \lambda_1 z_1 \Phi(z_1, z_2); \\
&\frac{1}{z_1} (\lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_1 + \mu_1 z_1 - \lambda_2 z_1 z_2 - \mu_1 - \lambda_1 z_1^2) \Phi(z_1, z_2) = \\
&= (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \Phi_0(z_2) - \mu_1 \frac{1}{z_1} \Phi_0(z_2) - \mu_1 \Phi_1(z_2). \quad (13)
\end{aligned}$$

Принимаем $z_1 = z_2 = 1$. Выражение (13) сводится к

$$\lambda_1 \Phi_0(1) - \mu_1 \Phi_1(1) = 0,$$

или

$$\begin{aligned}
\Phi_1(1) &= \frac{\lambda_1}{\mu_1} \Phi_0(1); \\
\Phi_i(1) &= \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i \Phi_0(1), \quad i \geq 0. \quad (14)
\end{aligned}$$

Просуммируем (14) по всем $i \geq 0$:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \Phi_i(1) = \Phi_0(1) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i,$$

используя нормировочное условие $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) = \Phi(1, 1) = 1$, получим

$$\Phi_0(1) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i}.$$

Поскольку $\lambda_1 < \mu_1$, то эта сумма сходится и, следовательно,

$$\begin{aligned}
\Phi_0(1) &= \frac{1}{1 + \frac{\mu_1}{\lambda_1} \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)} \\
&= \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_1}.
\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\Phi_0(1) = \sum_{j=0}^{\infty} p(0, j) = 1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1} = 1 - \rho_1; \quad (15)$$

$$\Phi_1(1) = \sum_{j=0}^{\infty} p(1, j) = \frac{\lambda_1}{\mu_1} - \frac{\lambda_1^2}{\mu_1^2} = \rho_1 - \rho_1^2; \quad (16)$$

$$\Phi_i(1) = \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j) = \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)^i = (1 - \rho_1) \rho_1^i. \quad (17)$$

Запишем (13) в виде

$$\frac{\lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_1 + \mu_1 z_1 - \lambda_2 z_1 z_2 - \mu_1 - \lambda_1 z_1^2}{z_1} \Phi(z_1, z_2) -$$

$$- \frac{\lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_1 + \mu_1 z_1 - \lambda_2 z_1 z_2 - \mu_1}{z_1} \Phi_0(z_2) + \mu_1 \Phi_1(z_2) = 0;$$

принимая $z_1 = 1$, получим

$$(\lambda_2 - \lambda_2 z_2) \Phi(1, z_2) - (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_2 z_2) \Phi_0(z_2) + \mu_1 \Phi_1(z_2) = 0. \quad (18)$$

Умножая (1) на z_2^j , суммируя по всем значениям j , $j \geq 1$, и пользуясь равенством (5), запишем:

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) \sum_{j=1}^{\infty} p(0, j) z_2^j =$$

$$= \lambda_2 \sum_{j=1}^{\infty} p(0, j-1) z_2^j + \mu_1 \sum_{j=1}^{\infty} p(1, j) z_2^j + \mu_2 \sum_{j=1}^{\infty} p(0, j+1) z_2^j;$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) \left[\sum_{j=0}^{\infty} p(0, j) z_2^j - p(0, 0) \right] =$$

$$= \lambda_2 z_2 \sum_{j=1}^{\infty} p(0, j-1) z_2^{j-1} + \mu_1 \left[\sum_{j=0}^{\infty} p(1, j) z_2^j - p(1, 0) \right] + \mu_2 \frac{1}{z_2} \left[\sum_{j=1}^{\infty} p(0, j+1) z_2^{j+1} \right];$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) [\Phi_0(z_2) - p(0, 0)] =$$

$$= \lambda_2 z_2 \Phi_0(z_2) + \mu_1 [\Phi_1(z_2) - p(1, 0)] + \frac{\mu_2}{z_2} [\Phi_0(z_2) - p(0, 0) - z_2 p(0, 1)];$$

$$\begin{aligned}
& (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)\Phi_0(z_2) - \lambda_2 z_2 \Phi_0(z_2) - \frac{\mu_2}{z_2} \Phi_0(z_2) = \\
& = (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p(0,0) - \frac{\mu_2}{z_2} p(0,0) - \mu_1 p(1,0) - \mu_2 p(0,1) + \mu_1 \Phi_1(z_2); \\
& \quad \frac{\lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_2 + \mu_2 z_2 - \lambda_2 z_2^2 - \mu_2}{z_2} \Phi_0(z_2) = \\
& = (\lambda_1 + \lambda_2)p(0,0) + \mu_2 p(0,0) - \frac{\mu_2}{z_2} p(0,0) - \mu_1 p(1,0) - \\
& \quad - \mu_2 p(0,1) + \mu_1 \Phi_1(z_2); \\
& \quad [(\lambda_1 + \lambda_2)p(0,0) = \mu_1 p(1,0) + \mu_2 p(0,1)]; \\
& \quad \frac{\lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_2 + \mu_2 z_2 - \lambda_2 z_2^2 - \mu_2}{z_2} \Phi_0(z_2) = \frac{(\mu_2 z_2 - \mu_2)p(0,0)}{z_2} + \mu_1 \Phi_1(z_2). \quad (19)
\end{aligned}$$

Представим уравнение (18) в виде

$$\mu_1 \Phi_1(z_2) = \frac{(\lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_2 + \mu_2 z_2 - \lambda_2 z_2^2 - \mu_2)\Phi_0(z_2) - (\mu_2 z_2 - \mu_2)p(0,0)}{z_2}.$$

Подставим полученное выражение в (18) и выразим производящую функцию $\Phi(1, z_2)$ через

$$\begin{aligned}
& \lambda_2 z_2 (1 - z_2) \Phi(1, z_2) = (\lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_2 - \lambda_2 z_2^2) \Phi_0(z_2) - \\
& - (\lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_2 + \mu_2 z_2 - \lambda_2 z_2^2 - \mu_2) \Phi_0(z_2) + (\mu_2 z_2 - \mu_2) p(0,0); \\
& \lambda_2 z_2 (1 - z_2) \Phi(1, z_2) = (1 - z_2) \mu_2 \Phi_0(z_2) - (1 - z_2) \mu_2 p(0,0);
\end{aligned}$$

$$\lambda_2 z_2 \Phi(1, z_2) = \mu_2 \Phi_0(z_2) - \mu_2 p(0,0).$$

Продифференцируем конечное выражение:

$$\lambda_2 \left[\Phi(1, z_2) + z_2 \frac{\partial \Phi(1, z_2)}{\partial z_2} \right] = \mu_2 \Phi_0'(z_2).$$

Принимая $z_2 = 1$, получаем

$$\left. \frac{\partial \Phi(1, z_2)}{\partial z_2} \right|_{z_2=1} = \frac{\mu_2 \Phi_0(1) - \lambda_2}{\lambda_2}. \quad (20)$$

Для определения среднего числа пакетов высокоприоритетного трафика запишем ряд:

$$\left. \frac{\partial \Phi(z_1, 1)}{\partial z_1} \right|_{z_1=1} = \sum_{i=0}^{\infty} i \sum_{j=0}^{\infty} p(i, j).$$

Воспользовавшись ранее полученной формулой (17) и применяя прием с производной степенного ряда, получаем:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \Phi(z_1, 1)}{\partial z_1} \right|_{z_1=1} &= \sum_{i=0}^{\infty} i (1 - \rho_1) \rho_1^i = (1 - \rho_1) \sum_{i=0}^{\infty} i \rho_1^i = \\ &= (1 - \rho_1) \rho_1 \frac{\partial}{\partial \rho_1} \sum_{i=0}^{\infty} \rho_1^i = (1 - \rho_1) \rho_1 \frac{\partial}{\partial \rho_1} \left(\frac{1}{1 - \rho_1} \right), \end{aligned}$$

откуда

$$\left. \frac{\partial \Phi(z_1, 1)}{\partial z_1} \right|_{z_1=1} = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1}. \quad (21)$$

Запишем уравнение (13) в виде

$$\begin{aligned} \lambda_1 \Phi(z_1, z_2) + \lambda_2 \Phi(z_1, z_2) + \mu_1 \Phi(z_1, z_2) - \lambda_2 z_2 \Phi(z_1, z_2) - \frac{\mu_1}{z_1} \Phi(z_1, z_2) - \lambda_1 z_1 \Phi(z_1, z_2) = \\ = (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 - \lambda_2 z_2) \Phi_0(z_2) - \frac{\mu_1}{z_1} \Phi_0(z_2) - \mu_1 \Phi_1(z_2). \end{aligned}$$

Продифференцируем полученное выражение относительно z_1 :

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_1)}{\partial z_1} + \lambda_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} + \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} - \lambda_2 z_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} - \\ - \mu_1 \left[\frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{z_1 \partial z_1} - \frac{\Phi(z_1, z_2)}{z_1^2} \right] - \lambda_1 \left[\Phi(z_1, z_2) + z_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right] = \frac{\mu_1}{z_1^2} \Phi_0(z_2). \end{aligned}$$

Выполним преобразования в полученном выражении:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_1)}{\partial z_1} + \lambda_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} + \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} - \lambda_2 z_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} - \\ - \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{z_1 \partial z_1} + \frac{\mu_1}{z_1^2} \Phi(z_1, z_2) - \lambda_1 \Phi(z_1, z_2) - \lambda_1 z_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} = \frac{\mu_1}{z_1^2} \Phi_0(z_2). \end{aligned}$$

Далее произведем операцию дифференцирования относительно z_2 :

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1 \partial z_2} + \lambda_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1 \partial z_2} + \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1 \partial z_2} - \\ & - \lambda_2 \left[\frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1 \partial z_2} \right] - \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{z_1 \partial z_1 \partial z_2} + \\ & + \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{z_1^2 \partial z_2} - \lambda_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_2} - \lambda_1 z_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1 \partial z_2} = \frac{\mu_1}{z_1^2} \Phi_0'(z_2). \end{aligned}$$

Принимая $z_1 = z_2 = 1$, получаем:

$$-\lambda_2 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_1} \Big|_{z_1=1, z_2=1} + \mu_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_2} \Big|_{z_1=1, z_2=1} - \lambda_1 \frac{\partial \Phi(z_1, z_2)}{\partial z_2} \Big|_{z_1=1, z_2=1} = \mu_1 \Phi_0(1).$$

Учитывая формулы (20) и (21), приходим к тому, что

$$-\lambda_2 \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_1} + \mu_1 \frac{\mu_2 \Phi_0(1) - \lambda_2}{\lambda_2} - \lambda_1 \frac{\mu_2 \Phi_0'(1) - \lambda_2}{\lambda_2} = \mu_1 \Phi_0'(1),$$

или

$$\frac{\mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \mu_2 - \mu_1 \lambda_2}{\lambda_2} \Phi_0'(1) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 + \mu_1^2 - 2\mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2}{\mu_1 - \lambda_1}.$$

Из последнего выражения следует

$$\begin{aligned} \Phi_0'(1) &= \frac{\lambda_1 \lambda_2^2 + \mu_1^2 \lambda_2 - 2\mu_1 \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1^2 \lambda_2}{\mu_1^2 \mu_2 - 2\mu_1 \lambda_1 \mu_2 - \mu_1^2 \lambda_2 + \lambda_1^2 \mu_2 + \mu_1 \lambda_1 \lambda_2} = \\ &= \frac{\alpha \rho_1 \rho_2^2 + \rho_2 - 2\rho_1 \rho_2 + \rho_1^2 \rho_2}{1 - 2\rho_1 - \rho_2 + \rho_1^2 + \rho_1 \rho_2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\alpha = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ – отношение интенсивностей переходов (или времен обслуживания для высокоприоритетного трафика, формируемого значениями рабочих выходов (нагрузка первого класса), и низкоприоритетного трафика, формируемого значениями тестового вектора (нагрузка второго класса)).

На основании определения $\Phi_0'(1)$ и равенства (20) запишем

$$\frac{\partial \Phi(1, z_2)}{\partial z_2} \Big|_{z_2=1} = \frac{\mu_2 \Phi_0(1) - \lambda_2}{\lambda_2} = \frac{\lambda_1 \mu_2 \lambda_2 + \mu_1^2 \lambda_2 - \mu_1 \lambda_1 \lambda_2}{\mu_1^2 \mu_2 - 2\mu_1 \lambda_1 \mu_2 - \mu_1^2 \lambda_2 + \lambda_1^2 \mu_2 + \mu_1 \lambda_1 \lambda_2}.$$

Переходя к использованию введенных ранее обозначений, получаем следующее выражение, характеризующее среднее число заявок диагностического теста при абсолютном приоритете информационных кодовых векторов:

$$E(i) = \frac{\alpha \rho_1 \rho_2 + \rho_2 - \rho_1 \rho_2}{1 - 2\rho_1 - \rho_2 + \rho_1^2 + \rho_1 \rho_2}. \quad (23)$$

3 Определение среднего числа обслуженных заявок информационных кодовых векторов от объектов контроля в условиях относительного приоритета

Исходные данные для решения данной задачи идентичны указанным в предыдущем пункте. Но для данного варианта требуется учесть еще одно допущение: трафику (заявкам) от объектов диагностирования предоставляется абсолютный приоритет перед нагрузкой второго класса только в том случае, если канал в данный момент времени не занят обслуживанием низкоприоритетного сообщения.

Для определения среднего числа пакетов высокоприоритетного трафика необходимо составить систему уравнений статистического равновесия и применить для ее решения производящие функции. Пространство состояний системы является, в общем случае, двумерным и определяется числом n состояний канала и числом i пакетов нагрузки информационных векторов от объектов контроля. При $N = 1$ имеет место $n = 0$ или $n = 1$, а $i = 0, 1, 2, \dots$

В рассматриваемом случае могут быть составлены две системы уравнений равновесия, одна для случая $n = 0$ и вторая для $n = 1$. При $n = 0$ имеем

$$(\lambda_1 + \lambda_2)p(0,0) = \mu_2 p(1,0) + \mu_1 p(0,1) \quad (24)$$

и

$$(\lambda_1 + \mu_1)p(0,i) = \lambda_1 p(0,i-1) + \mu_2 p(1,i) + \mu_1 p(0,i+1), \quad i \geq 1. \quad (25)$$

Аналогичным образом при $n = 1$ получим

$$(\lambda_1 + \mu_2)p(1,0) = \lambda_2 p(0,0) \quad (26)$$

и

$$(\lambda_1 + \mu_2)p(1,i) = \lambda_1 p(1,i-1), \quad i \geq 1. \quad (27)$$

Нормирующее условие имеет вид

$$\sum_{n,i} p(n,i) = \sum_{i=0}^{\infty} p(0,i) + \sum_{i=0}^{\infty} p(1,i) = 1. \quad (28)$$

Из уравнения (26) непосредственно получается зависимость $p(1,0)$ от $p(0,0)$. Применяя (26) к (24), можно получить зависимость $p(0,1)$ от $p(0,0)$:

$$p(0,1) = \left(\frac{\lambda_1^2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \lambda_1 + \mu_1 \mu_2} \right) p(0,0). \quad (29)$$

Определим $\Phi_0(z)$ и $\Phi_1(z)$ как производящие функции для распределения вероятностей $p(0,i)$ и $p(1,i)$:

$$\Phi_0(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p(0,i) z^i; \quad (30)$$

$$\Phi_1(z) = \sum_{i=1}^{\infty} p(1,i) z^i. \quad (31)$$

Умножим выражение (27) на z^i , просуммируем по всем $i \geq 1$ и выполним ряд преобразований:

$$(\lambda_1 + \mu_2) \sum_{i=1}^{\infty} p(1,i) z^i = \lambda_1 \sum_{i=1}^{\infty} p(1,i-1) z^i;$$

$$(\lambda_1 + \mu_2) \left[\sum_{i=0}^{\infty} p(1,i) z^i - p(1,0) \right] = \lambda_1 z \sum_{i=1}^{\infty} p(1,i-1) z^{i-1};$$

$$(\lambda_1 + \mu_2) [\Phi_1(z) - p(1,0)] = \lambda_1 z \Phi_1(z);$$

$$(\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z) \Phi_1(z) = (\lambda_1 + \mu_2) p(1,0).$$

Воспользовавшись уравнением (26), получаем:

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z} \right) p(0,0). \quad (32)$$

Умножим выражение (25) на z^i , просуммируем по всем $i \geq 1$ и выполним ряд преобразований:

$$(\lambda_1 + \mu_1) \sum_{i=1}^{\infty} p(0,i) z^i = \lambda_1 \sum_{i=1}^{\infty} p(0,i-1) z^i + \mu_2 \sum_{i=1}^{\infty} p(1,i) z^i + \mu_1 \sum_{i=1}^{\infty} p(0,i+1) z^i;$$

$$\begin{aligned}
& (\lambda_1 + \mu_1) \left[\sum_{i=0}^{\infty} p(0, i) z^i - p(0, 0) \right] = \\
& = \lambda_1 z \sum_{i=1}^{\infty} p(0, i-1) z^{i-1} + \mu_2 \left[\sum_{i=0}^{\infty} p(1, i) z^i - p(1, 0) \right] + \mu_1 \frac{1}{z} \left[\sum_{i=1}^{\infty} p(0, i+1) z^{i+1} \right]; \\
& (\lambda_1 + \mu_1) [\Phi_0(z) - p(0, 0)] = \\
& = \lambda_1 z \Phi_0(z) + \mu_2 [\Phi_1(z) - p(1, 0)] + \frac{\mu_1}{z} [\Phi_0(z) - p(0, 0) - z p(0, 1)]; \\
& \lambda_1 \Phi_0(z) + \mu_1 \Phi_0(z) - \lambda_1 p(0, 0) - \mu_1 p(0, 0) = \\
& = \lambda_1 z \Phi_0(z) + \mu_2 \Phi_1(z) - \mu_2 p(1, 0) + \frac{\mu_1}{z} \Phi_0(z) - \frac{\mu_1}{z} p(0, 0) - \mu_1 p(0, 1); \\
& \frac{\lambda_1 z + \mu_1 z - \lambda_1 z^2 - \mu_1}{z} \Phi_0(z) = \\
& = \lambda_1 p(0, 0) + \mu_1 p(0, 0) - \frac{\mu_1}{z} p(0, 0) + \mu_2 \Phi_1(z) - \mu_2 p(1, 0) - \mu_1 p(0, 1).
\end{aligned}$$

С учетом формул (26), (29), (32), получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}
& \frac{\lambda_1 z + \mu_1 z - \lambda_1 z^2 - \mu_1}{z} \Phi_0(z) = \\
& = \frac{\lambda_1 z + \mu_1 z - \mu_1}{z} p(0, 0) + \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z} p(0, 0) - \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} p(0, 0) - \\
& \quad - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} p(0, 0); \\
& \frac{(\lambda_1 z - \mu_1)(1 - z)}{z} \Phi_0(z) = \\
& = \frac{\mu_1 \lambda_1 z - \mu_1 \lambda_1 + \mu_1 \mu_2 z - \mu_1 \mu_2 - \mu_2 \lambda_2 z - \lambda_1 \lambda_2 z}{z(\lambda_1 + \mu_2)} p(0, 0) + \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z} p(0, 0); \\
& \frac{(\lambda_1 z - \mu_1)(1 - z)}{z} \Phi_0(z) = \frac{(\mu_1 z - \mu_1 - \lambda_2 z)(\lambda_1 + \mu_2)}{z(\lambda_1 + \mu_2)} p(0, 0) + \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z} p(0, 0); \\
& \frac{(\lambda_1 z - \mu_1)(1 - z)}{z} \Phi_0(z) = \\
& = \frac{\mu_1 \lambda_1 z + \mu_1 \mu_2 z - \mu_1 \lambda_1 z^2 - \mu_1 \lambda_1 - \mu_1 \mu_2 + \mu_1 \lambda_1 z - \lambda_1 \lambda_2 z + \lambda_1 \lambda_2 z^2}{z(\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z)} p(0, 0); \\
& \frac{(\lambda_1 z - \mu_1)(1 - z)}{z} \Phi_0(z) = \frac{(\mu_1 \lambda_1 z - \mu_1 \lambda_1 - \mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \lambda_2 z)(1 - z)}{z(\lambda_1 + \mu_2 - \lambda_1 z)} p(0, 0);
\end{aligned}$$

$$\Phi_0(z) = \frac{\mu_1 \lambda_1 z - \mu_1 \lambda_1 - \mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \lambda_2 z}{\lambda_1^2 z - \lambda_1 \mu_1 + \lambda_1 \mu_2 z - \mu_1 \mu_2 - \lambda_1^2 z^2 + \mu_1 \lambda_1 z} p(0,0). \quad (33)$$

Для нахождения вероятности свободного состояния системы $p(0,0)$ необходимо воспользоваться нормирующим условием (28). На основании определения $\Phi_0(z)$ (30) и равенства (33) получим

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(0,i) = \Phi_0(1) = \frac{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2}{\mu_2 (\mu_1 - \lambda_1)} p(0,0). \quad (34)$$

Кроме того, из равенства (32) имеем

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(1,i) = \Phi_1(1) = \frac{\lambda_2}{\mu_2} p(0,0). \quad (35)$$

Тогда, подставляя в (28) значения из (34) и (35), найдем

$$p(0,0) = \frac{\mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \mu_1 \lambda_2} = \frac{1 - \rho_1}{1 + \rho_2}. \quad (36)$$

Отметим, что при $\rho_2 = 0$ получается результат $(1 - \rho_1)$ для классической системы массового обслуживания.

Среднее число пакетов высокоприоритетного трафика:

$$E(i) = \sum_{i=0}^{\infty} ip(0,i) + \sum_{i=0}^{\infty} ip(1,i) = \Phi_0'(1) + \Phi_1'(1). \quad (37)$$

Продифференцировав выражение (33) и принимая $z = 1$, получим

$$\Phi_0'(1) = \frac{\mu_1 \lambda_1 \mu_2 \lambda_2 + \mu_1 \lambda_1 \mu_2^2 - \lambda_1^3 \lambda_2 + \mu_1 \lambda_1^2 \lambda_2}{(\lambda_1 \mu_2 - \mu_1 \mu_2)^2} p(0,0).$$

При $p(0,0)$, определяемой на основании (36), найдем

$$\Phi_0'(1) = \frac{-\mu_1 \lambda_1 \mu_2 \lambda_2 - \mu_1 \lambda_1 \mu_2^2 + \lambda_1^3 \lambda_2 - \mu_1 \lambda_1^2 \lambda_2}{\mu_1 \lambda_1 \mu_2^2 + \mu_1 \lambda_1 \mu_2 \lambda_2 - \mu_1^2 \mu_2^2 - \mu_1^2 \mu_2 \lambda_2};$$

$$\Phi_0'(1) = \frac{\alpha \rho_1 \rho_2 + \alpha \rho_1 - \rho_1^3 \rho_2 + \rho_1^2 \rho_2}{\alpha (1 - \rho_1)(1 + \rho_2)}. \quad (38)$$

Продифференцировав выражение (32) и принимая $z = 1$, запишем:

$$\Phi_1'(1) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_2^2} p(0,0);$$

$$\Phi_1'(1) = \frac{\rho_1 \rho_2 - \rho_1^2 \rho_2}{\alpha(1 + \rho_2)}. \quad (39)$$

Таким образом, на основании определения $E(i)$ и равенств (38), (39), получаем выражение для определения среднего числа заявок информационных кодовых векторов в условиях относительного приоритета:

$$E(i) = \frac{\alpha \rho_1 \rho_2 + \alpha \rho_1 + \rho_1 \rho_2 - \rho_1^2 \rho_2}{\alpha(1 - \rho_1)(1 + \rho_2)}. \quad (40)$$

4 Пример подсчета среднего числа заявок диагностического теста

Приведем пример использования полученных выражений (23) и (40) для определения среднего числа заявок диагностического теста при абсолютном и относительном приоритетах на примере тестирования контроллера ПИК-120 [17].

Измерительные контроллеры ПИК-120 размещаются группами по четыре устройства, каждое из которых снабжено 120-ю функциональными выходами, образуя комплекс устройств (рис. 2). Тестирование каждого устройства ПИК-120 является независимой процедурой. Оценим средние показатели обслуживания устройств ПИК-120 при тестировании всех 120 выходов.

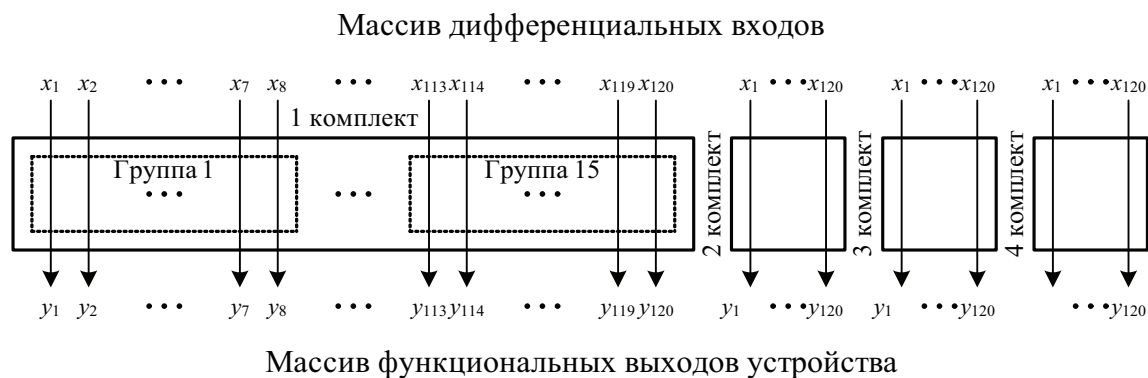


Рис. 2. Функциональная схема ПИК-120

Определим интенсивности информационных сообщений (входного потока диагностического устройства) и интенсивности событий обслуживания устройства.

При отсутствии диагностического обеспечения контроллера ПИК-120 скорость опроса дифференциальных входов и скорость получения команд от ХОСТ-процессора определяется величиной 9600 бод. Это, при использовании 4 битов передачи в каждом временном интервале, позволяет получать

фактическую скорость передачи, равную 37 600 бит/с. Тем не менее в реальных условиях функционирования устройств железнодорожной автоматики обновление информации происходит с периодом дискретизации до 6 с (это значение определяется исходя из условий функционирования устройств автоматики и установленной технической задержкой передачи сигнала для условий сохранения шунта под движущимся поездом на 4–6 с [34]). Поэтому скорость опроса датчиков контроллера ПИК-120 определяется возможностью опроса 120 дифференциальных входов за 6 секунд (при условии, что все входы подключены к объектам диагностирования; в реальности задействованы могут быть не все входы контроллера, что определяется спецификой объекта диагностирования и мониторинга). Таким образом, при максимальной загрузке каждый вход контроллера ПИК-120 может быть опрошен за 0,05 секунд. Интенсивность информационных сообщений составляет $\lambda_1 = 0,05 \text{ с}^{-1}$.

Интенсивность обслуживания заявок входного потока определяется из следующих соотношений. Все 120 дифференциальных входов контроллера ПИК-120 образуют 120-битный вектор. При скорости передачи данных 37 600 бит/с это составляет

$$t_{\text{обсл}_1} = \frac{120}{37600} \approx 0,0032 \text{ с},$$

откуда следует, что $\mu_1 = 312,5 \text{ с}^{-1}$.

Интенсивность заявок диагностического теста представляет собой, в общем случае, два потока по 120 сигналов логического нуля или логической единицы. Интенсивность данного потока при однократной передаче 240-битного сигнала один раз в 6 секунд составляет $\lambda_2 = 0,025 \text{ с}^{-1}$. Интенсивность обслуживания составляет $\mu_2 = 156,25 \text{ с}^{-1}$, а время обслуживания $t_{\text{обсл}_2} = 0,0064 \text{ с}$.

Определим интенсивности нагрузки устройства ПИК-120 – показатели ρ_1 и ρ_2 :

$$\rho_1 = \frac{0,05}{312,5} = 0,00016;$$

$$\rho_2 = \frac{0,025}{156,25} = 0,00016.$$

Показатели ρ_1 и ρ_2 определяют степени согласованности входного и выходного потоков заявок канала обслуживания и характеризуют устойчивость системы массового обслуживания.

Пользуясь формулами (23) и (40), определим среднее число заявок диагностического теста при абсолютном и относительном приоритетах.

Вычислим показатель α :

$$\alpha = \frac{156,25}{312,5} = 0,5.$$

Воспользуемся непосредственно формулой (23):

$$E(i) = \frac{0,5 \cdot 0,00016 \cdot 0,00016 + 0,00016 - 0,00016 \cdot 0,00016}{1 - 2 \cdot 0,00016 - 0,00016 + 0,00016^2 + 0,00016 \cdot 0,00016} \approx 0,00016.$$

Воспользуемся непосредственно формулой (40):

$$E(i) = \frac{0,5 \cdot 0,00016 \cdot 0,00016 + 0,5 \cdot 0,00016 + 0,00016 \cdot 0,00016 - 0,00016^2 \cdot 0,00016}{0,5 \cdot (1 - 0,00016)(1 + 0,00016)} \approx 0,00016.$$

Для представленного примера расчетов при абсолютном и относительном приоритетах заявок получен идентичный результат: среднее число заявок диагностического теста составило 0,00016 – этого достаточно для проведения процедуры тестирования измерительного контроллера ПИК-120. Следует также учесть, что расчет приведен на случай использования всех дифференциальных входов контроллера ПИК-120, а в реальности время опроса и интенсивности загрузки определяются исходя их условий подключения измерительного контроллера к объектам диагностирования. Таким образом, полученные результаты являются верхней оценкой числа заявок диагностического теста.

Исходя из полученного результата, можно говорить, что обслуживание заявок диагностического тестового вектора, как при абсолютном, так и относительном приоритете может быть осуществлено в течение одного цикла обновления информационных данных на дифференциальных входах контроллера ПИК-120. Однако данные результаты получены при определенных исходных условиях, к которым, прежде всего, относится ограничение на периоды обновления данных от устройств контроля не чаще чем 1 раз в 6 секунд. Данные вычисления – первый шаг к интеллектуальному теоретическому обоснованию частоты опроса устройств систем мониторинга объектов железнодорожной автоматики (и инфраструктуры в целом), которые в итоге должны определить порядок их диагностирования. Дальнейшее развитие данной теории – выделение групп измерений для каждого типа и назначение приоритета каждой группе. Таким образом, на выходе будут иметься трафики с разными приоритетами, а сам выбор способа диагностирования для устройств коммутации можно осуществить с наименьшим влиянием на рабочие сигналы и с минимальной загрузкой сетей передачи данных.

Следует отметить, что сформулированная выше задача ранее решалась при оценке загрузки серверов систем мониторинга искусственных сооружений [35, 36]. В данных работах предложено анализировать поступающие заявки от диагностического оборудования с помощью нестационарных моделей. Развивая предложенный метод (или же используя законы сохранения [31]), можно дать оценку среднего времени обслуживания заявок с различ-

ными приоритетами для многоканальной системы. Альтернативой является решение поставленной задачи в нестационарном виде.

Заключение

При диагностировании измерительных контроллеров системы АПК-ДК рекомендовано выделение двух типов заявок: высокоприоритетных заявок рабочих воздействий измерительного контроллера и низкоприоритетных заявок тестовых воздействий. На основании этого определены выражения для установления среднего количества заявок тестовых комбинаций измерительных контроллеров. Эту информацию следует учитывать при выборе времени начала процедуры тестирования измерительного контроллера и выборе периода диагностирования.

Данный метод апробирован и прошел процедуру адаптации к программному обеспечению низового уровня системы АПК-ДК. На основании рассчитанных данных сформированы алгоритмы запуска процедуры тестирования и самого процесса самодиагностирования измерительных контроллеров системы мониторинга АПК-ДК. Это позволяет на практике своевременно идентифицировать неверно функционирующие датчики измерительных контроллеров и предупредить появление недостоверной диагностической информации в программном обеспечении системы мониторинга.

Следует отметить и альтернативный вариант тестирования измерительных контроллеров систем мониторинга. Во многих устройствах входы объединяются в группы (часто по 8 входов в каждой), в том числе для устройства ПИК-120 (15 групп по 8 входов в каждой). Тестирование можно осуществлять в рамках одной группы [28]. При этом отключается только одна группа входов, а само измерительное устройство описывается как многоканальная система массового обслуживания.

Предложенный подход к оценке среднего числа заявок при формировании диагностического теста измерительных контроллеров в условиях абсолютного и относительного приоритетов может быть использован также при разработке и выборе режимов функционирования новых измерительных контроллеров различных систем технического диагностирования и мониторинга как устройств автоматики, так и железнодорожной инфраструктуры в целом. Опираясь на данный подход, можно оптимизировать процедуры тестирования измерительных контроллеров и тем самым оперативно фиксировать наиболее уязвимые с позиции надежности элементы систем мониторинга.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность доктору технических наук, профессору кафедры «Информационные и вычислительные системы»

Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I Владимиру Петровичу Бубнову за конструктивную критику материалов статьи, позволившую улучшить ее текст, а также наметить новые перспективные направления дальнейших исследований в области совершенствования подсистем периферийных объектов систем непрерывного контроля и мониторинга.

Библиографический список

1. Харченко В. С. Модели и свойства многоальтернативных отказоустойчивых систем / В. С. Харченко // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 12. – С. 140–147.
2. Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf. – L. : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
3. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
4. Каравай М. Ф. Инвариантно-групповой подход к исследованию k-отказоустойчивых структур / М. Ф. Каравай // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 1. – С. 144–156.
5. Скляр В. В. Отказоустойчивые компьютерные системы управления с версионно-пороговой адаптацией: способы адаптации, оценка надежности, выбор архитектуры / В. В. Скляр, В. С. Харченко // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 6. – С. 131–145.
6. Dobias R. FPGA Based Design of the Railway's Interlocking Equipments / R. Dobias, H. Kubatova // Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD 2004), 31 August – 3 September 2004, Rennes, France. – Pp. 467–473.
7. Ададунов С. Е. Интеллектуальная система мониторинга искусственных сооружений / С. Е. Ададунов, В. А. Шабельников // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. – № 3. – С. 32–37.
8. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus // Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.
9. Eychenne Ch. An Effective Functional Safety Infrastructure for System-on-Chips / Ch. Eychenne, Y. Zorian // Proceedings of 23rd IEEE On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS'2017), Thessaloniki, Greece, 3–5 July 2017. – Pp. 63–66.
10. Ahmad F. Component Based Architecture for the Control of Crossing Regions in Railway Networks / F. Ahmad, A. Sadiq, A. M. Martinez-Enriquez, A. Muhammad, M. W. Anwar, U. U. Bajwa, M. Naseer, S. A. Khan // 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 18–21 December 2017, Cancun, Mexico. – Pp. 540–545.
11. Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфра-

- структуры / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 331–351.
12. Hahanov V.I. Cloud Traffic Control System / V.I. Hahanov, O.A. Gus, A. Ziarmand, N.C. Umerah, A. Arefjev // Proceedings of 11th East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2013), Rostov-on-Don, 2013. – Pp. 72–76.
 13. Белый А. А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса / А. А. Белый // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2. – С. 64–74.
 14. Belyi A.A. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) / A.A. Belyi, E. S. Karapetov, Yu. I. Efimenko // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – Pp. 145–151.
 15. Kacou M.A. Error Rate Estimation of a Design Implemented in an FPGA based on the Operating Conditions / M.A. Kacou, F. Ghaffari, O. Romain, B. Condamin // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 459–465.
 16. Бойков В. Н. Цифровая автомобильная дорога как отраслевой сегмент цифровой экономики / В. Н. Бойков, А. В. Скворцов, Д. С. Сарычев // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 2. – С. 56–60.
 17. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
 18. Шаманов В. И. Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики / В. И. Шаманов, А. В. Пультяков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 1. – С. 82–85.
 19. Шаманов В. И. Математические модели надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 7–19.
 20. Лыков А. А. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5. – С. 67–72.
 21. Иванов А. А. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства / А. А. Иванов, А. К. Легоньков, В. П. Молодцов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 65–80.
 22. Насонов Г. Ф. Радиоканал для передачи данных в системах непрерывного мониторинга / Г. Ф. Насонов, Г. В. Осадчий, Д. В. Ефанов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 11. – С. 2–5.
 23. Насонов Г. Ф. 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.
 24. Efanov D. New Technology in Sphere of Diagnostic Information Transfer within Monitoring System of Transportation and Industry / D. Efanov, D. Pristensky, G. Osadchy, I. Razvitnov, D. Sedykh, P. Skurlov // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 231–236.

25. Москвина Е. А. Опыт организации ЦУСИ / Е. А. Москвина // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 9. – С. 22–25.
26. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
27. Ефанов Д. В. Микропроцессорная система диспетчерского контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий. – СПб. : Лань, 2018. – 176 с.
28. Осадчий Г. В. Определение метода реализации технической диагностики контроллеров в системе АПК-ДК / Г. В. Осадчий // Транспорт Урала. – 2007. – № 2. – С. 78–82.
29. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1 / В. Феллер ; пер. с англ., предисл. А. Н. Колмогорова. – Изд. 2-е. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 528 с.
30. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок ; пер. с англ. И. И. Грушко ; ред. В. И. Нейман. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
31. Рыжиков Ю. И. Машинные методы расчета систем массового обслуживания / Ю. И. Рыжиков. – Л. : Военный инженерный краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского, 1979. – 177 с.
32. Рыжиков Ю. И. Расчет многоканальных систем обслуживания с абсолютным и относительным приоритетами на основе инвариантов отношения / Ю. И. Рыжиков, А. Д. Хомоненко // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 3. – С. 11–16.
33. Зорич В. А. Математический анализ. Ч. II / В. А. Зорич. – Изд. 5-е. – М. : МЦНМО, 2007. – XIV + 794 с.
34. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на федеральном железнодорожном транспорте НТП СЦБ/МПС-99 : утв. указанием МПС РФ от 24 июня 1999 г. №А-1113. – СПб., 1999. – 75 с.
35. Сергеев С. А. Многоканальная нестационарная модель удаленного сервера сервера автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений / С. А. Сергеев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 85–91.
36. Бубнов В. П. Нестационарные модели локального сервера автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений / В. П. Бубнов, С. А. Сергеев // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 2. – С. 102–115.

Dmitry V. Efanov
«Automation, Remote Control and Communication
on Railway Transport» department,
Russian University of Transport (MIIT),
«LocoTech-Signal LLC»

German V. Osadchy
Scientific and Technical Center «Integrated Monitoring Systems» LLC

**The determination of the average number of completed requests
for a diagnostic test of measuring controllers
in health monitoring systems**

The article considers the problem of the providing of the testing the most unreliable level of modern systems of external technical diagnosis and monitoring of railway automation and remote control devices – the level of diagnostic information collection by measuring controllers. It is noted that the measuring controllers of railway automation monitoring systems self-diagnosis procedure is initiated by the hub of diagnostic information, to which the measurement controllers are connected. The timeliness of the identification of disturbances in the measuring controllers operation depends on the diagnosis period, the time of filing the test, and on the set of test combinations. It is proposed to consider the issue of the sensors of measuring controllers testing as a task of the queuing process in the mass service system. All applications are divided into two categories according to priorities: the first category includes the working signals from the objects of diagnosis (high-priority applications), and the second category includes the code vectors of the diagnostic test (low-priority applications). Applications from the objects of diagnosis have absolute priority over the test load. In this regard, the article developed the approach to the determination of the average number of requests of the diagnostic test with the absolute priority and also with the relative priority. The practical side of the result is the ability to select the most effective time intervals for the test impact on the measuring controller sensors in the monitoring system and the selection of the test procedure time.

technical diagnosis and monitoring systems; measuring controller; testing; fault-tolerance; diagnostic test

References

1. Kharchenko V. S. (1992). Models and properties of multialternative fault-tolerant systems [Modeli i svoystva mnogoal'ternativnykh otkazoustojchivyyh system], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 12. – Pp. 140–147.
2. Goessel M., Graf S. (1994). Error Detection Circuits. London, McGraw-Hill. – 261 p.
3. Gavzov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1994). Methods for ensuring the safety of discrete systems [Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh

- sistem], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 3–50.
4. Karavaj M. F. (2000). An invariant-group approach to investigation of k-fault-tolerant structures [Invariantno-gruppovoj podhod k issledovaniyu k-otkazoustojchivyh struktur], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2000, issue 1. – Pp. 144–156.
 5. Sklyar V. V., Harchenko V. S. (2002). Fault-Tolerant Computer-Aided Control Systems with Multiversion-Threshold Adaptation: Adaptation Methods, Reliability Estimation, and Choice of an Architecture [Otkazoustojchivye komp'yuternye sistemy upravleniya s versionno-porogovoj adaptaciej: sposoby adaptacii, ocenka nadezhnosti, vybor arkhitektur], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 131–145.
 6. Dobias R., Kubatova H. (2004). FPGA Based Design of the Railway's Interlocking Equipments. Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD 2004), 31 August – 3 September 2004, Rennes, France. – Pp. 467–473.
 7. Adadurov S. E., Shabel'nikov V. A. (2009). Intellectual system for monitoring artificial structures [Intellektual'naya sistema monitoringa iskusstvennyh sooruzhenij], the World of Transport [Mir transporta], vol. 7, issue 3. – Pp. 32–37.
 8. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. (2011). Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.
 9. Eychenne Ch., Zorian Y. (2017). An Effective Functional Safety Infrastructure for System-on-Chips. Proceedings of 23rd IEEE On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS'2017), Thessaloniki, Greece, 3–5 July 2017. – Pp. 63–66.
 10. Ahmad F., Sadiq A., Martinez-Enriquez A. M., Muhammad A., Anwar M. W., Bajwa U. U., Naseer M., Khan S. A. (2017). Component Based Architecture for the Control of Crossing Regions in Railway Networks. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 18–21 December 2017, Cancun, Mexico. – Pp. 540–545.
 11. Efanov D. V. (2018). Work peculiarities of technical diagnostics and health monitoring systems of railway infrastructure objects theory [Osobennosti funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i nepreryvnogo monitoringa ob'ektov zheleznodorozhnoj infrastruktury], Automation on Transport [Avtomatika na transporte], vol. 4, issue 3. – Pp. 331–351.
 12. Hahanov V. I., Gus O. A., Ziarmant A., Umerah N. C., Arefjev A. (2013). Cloud Traffic Control System. Proceedings of 11th East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2013), Rostov-on-Don, 2013. – Pp. 72–76.
 13. Belyj A. A. (2017). Probability forecasting of the technical condition of reinforced concrete bridge constructions operated in megalopolis [Veroyatnostnoe prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya ehkspluatiruemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzhenij megalopolisa], Bulletin of Civil Engineers [Vestnik grazhdanskih inzhenerov], issue 2. – Pp. 64–74.
 14. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. (2017). Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). Procedia Engineering, vol. 189. – Pp. 145–151.

15. Kacou M. A., Ghaffari F., Romain O., Condamin B. (2017). Error Rate Estimation of a Design Implemented in an FPGA based on the Operating Conditions. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 459–465.
16. Bojkov V. N., Skvorcov A. V., Sarychev D. S. (2018). Digital motorway as an industry segment of digital economy [Cifrovaya avtomobil'naya doroga kak otras-levoj segment cifrovoj ehkonomiki], Transport of the RF [Transport Rossijskoj Federacii], issue 2. – Pp. 56–60.
17. Efanov D. V. (2016). Concurrent checking and monitoring of railway automation and remote control devices [Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], St. Petersburg, Publishing house of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [FGBOU VO PGUPS]. – 171 p.
18. Shamanov V. I., Pul'tyakov A. V. (2008). Markov model of the process of maintenance and repair of automation devices [Markovskaya model' processa tekhnicheskogo obsluzhi-vaniya i remonta ustrojstv avtomatiki]. Modern technologies. System analysis. Modeling [Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie], issue 1. – Pp. 82–85.
19. Shamanov V. I. (2017). Mathematical models of reliability of railway automation and telemechanics systems [Matematicheskie modeli nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on Transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, issue 1. – Pp. 7–19.
20. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. (2012). Technical diagnostics and monitoring of RAT units [Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustrojstv ZHAT], Transport of the RF [Transport Rossijskoj Federacii], issue 5. – Pp. 67–72.
21. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodcov V. P. (2016). Data transmission from APK-DK devices of rail crossing under the absence of physical link and clock duty [Peredacha dannyh s ustrojstv oborudovaniya perezda apparaturoj APK-DK pri otsutstvii fizicheskoy linii i kruglosutochnogo dezhurstva], Automation on Transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, issue 1. – Pp. 65–80.
22. Nasonov G. F., Osadchij G. V., Efanov D. V., Sedyh D. V. (2016). Radio channel for data transmission in continuous monitoring systems [Radiokanal dlya peredachi dannykh v sistemah nepreryvnogo monitoring], Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 11. – Pp. 2–5.
23. Nasonov G. F., Osadchij G. V., Efanov D. V., Sedyh D. V. (2017). Data transmission networks for monitoring infrastructure facilities [Seti peredachi dannyh dlya monitoringa ob'ektov infrastruktury], Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 2. – Pp. 5–8.
24. Efanov D., Pristensky D., Osadchy G., Razvitnov I., Sedykh D., Skurlov P. (2017). New Technology in Sphere of Diagnostic Information Transfer within Monitoring System of Transportation and Industry. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2. – Pp. 231–236.
25. Moskvina E. A. (2013). The experience of organizing a single situational center [Opyt organizacii CUSI], Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 9. – Pp. 22–25.

26. Molodcov V.P., Ivanov A.A. (2010). Systems of dispatching control and monitoring of devices of railway automatics and telemechanics [Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], St. Petersburg, Petresburg state transport university [Peterburgskij gosudarstvennyi universitet putej soobshcheniya]. – 140 p.
27. Efanov D. V., Osadchij G. V. (2018). Microprocessor dispatch control system for rail automation and telemechanics devices [Mikroprocessornaya sistema dispetcherskogo kontrolya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. St. Petersburg, «Lan'». – 176 p.
28. Osadchij G. V. (2007). Determination of the method of implementation of technical diagnostics of controllers in the APK-DK system [Opredelenie metoda realizacii tekhnicheskoy diagnostiki kontrollerov v sisteme APK-DK], Transport of the Ural [Transport Urala], issue 2. – Pp. 78–82.
29. Feller W. (2010). Introduction to probability theory and its applications: Vol. 1 [Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya: T. 1]. Foreword A. N. Kolmogorov. 2nd ed. Moscow, Publishing house «LIBROKOM» [Knizhnyj dom «LIBROKOM»]. – 528 p.
30. Kleinrock L. (1979). Queueing systems. Vol. 1: Theory [Teoriya massovogo obsluzhivaniya]. Trans. I. I. Grushko; ed. V. I. Neiman. Moscow, Mechanical engineering [Mashinostroenie], 1979. – 432 p.
31. Ryzhikov Yu. I. (1979). Machine methods for calculating queueing systems [Mashinnye metody rascheta sistem massovogo obsluzhivaniya]. Leningrad, Military Engineering Red Banner Institute. A. F. Mozhaisky [Voennyj inzhenernyj krasnoznamennyj institut im. A. F. Mozhajskogo]. – 177 p.
32. Ryzhikov Yu. I., Homonenko A. D. (2015). Calculation of Multi-Channel Queueing Systems with Absolute and Relative Priorities on the Basis of Invariants Relationship [Raschet mnogokanal'nyh sistem obsluzhivaniya s absolyutnym i otnositel'nym prioritetami na osnove invariantov otnosheniya]. Intellectual Technologies on Transport [Intellektual'nye tekhnologii na transporte], issue 3. – Pp. 11–16.
33. Zorich V.A. (2007). Mathematical analysis: II part [Matematicheskij analiz: Chast' II]. 5th ed. Moscow, MCNMO. – XIV+794 p.
34. Norms of technological design of automation and telemechanics devices on the federal railway transport of STP STSB/IPS-99 [Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya ustrojstv avtomatiki i telemekhaniki na federal'nom zheleznodorozhnom transporte NTP SCB/MPS-99]. Approved by the decree of the Ministry of Railways of the Russian Federation of June 24, 1999, No.A-1113, St. Petersburg, 1999. – 75 p.
35. Sergeev S.A. (2016). Multiple-Line Non-Stationary Model of a Remote Server for Automated System for Monitoring of Engineering Structures [Mnogokanal'naya nestacionarnaya model' udalyonnogo servera servera avtomatizirovannoj sistemy monitoringa iskusstvennyh sooruzhenij]. Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 85–91.
36. Bubnov V.P., Sergeev S.A. (2016). Non-Stationary Models of a Local Server of the Automated System for Monitoring Artificial Structures [Nestacionarnye mo-

deli lokal'nogo servera avtomatizirovannoj sistemy monitoringa iskusstvennyh sooruzhenij]. SPIIRAS Proceedings [Trudy SPIIRAN], issue 2. – Pp. 102–115.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским
Поступила в редакцию 01.06.2018, принята к публикации 29.06.2018*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ), руководитель направления систем мониторинга и диагностики ООО «ЛокоТех-Сигнал». e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ОСАДЧИЙ Герман Владимирович – технический директор ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга». e-mail: osgerman@mail.ru

© Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., 2018