УДК 004.05: 004.7: 004.9 DOI: 10.17587/mau.19.86-94.

В. И. Фрейман, канд. техн. наук, проф., vfrey@mail.ru,
А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, uz@at.pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Диагностирование и оценка состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами

Предложены обобщенная и детализированная диагностические модели элементов систем управления, выполнено их математическое описание с помощью методов теории графов. Показан подход к разработке алгоритмов оценки состояния элементов систем управления, приведены результаты их практической реализации. Предложена методика расчета и анализа эксплуатационно-технических показателей элементов систем управления, основанная на методах теории надежности, приведен пример использования методики.

Ключевые слова: *системы управления, эксплуатационно-технические показатели, надежность, модель, граф, диагностирование, восстановление*

Введение

В современных экономических и политических условиях промышленность РФ все активнее переходит к разработке и выпуску отечественной импортозамещающей продукции, особенно высокотехнологичной аппаратуры различной функциональности и назначения. Наиболее эффективным и обоснованным становится ее применение в качестве элементов и устройств *систем управления* технологическими объектами, относящимися к "критической инфраструктуре": энергетике, транспорту, добыче и переработке сырья, коммуникациям, национальной безопасности и др. [1].

Для обеспечения профильной деятельности технологических систем различного назначения строится *распределенная инфраструктура* (РИС), компоненты и подсистемы которой решают задачи автоматизации технологических процессов, организации взаимодействия с использованием информационных и телекоммуникационных технологий, управления предприятием и т.п. Поэтому для выполнения требований к качественным и эксплуатационным показателям технологических систем, их объектов и процессов необходимо проектировать и производить высоконадежные компоненты, элементы и устройства систем управления [2], а также применять эффективные способы и средства обеспечения надежности их функционирования при эксплуатации [3].

Для обеспечения заданных эксплуатационно-технических показателей РИС необходимо повышать эффективность диагностирования технического состояния элементов систем управления (СУ). Работы в данном направлении проводятся отечественными учеными (в частности, в области функционального диагностирования [4], повышения отказоустойчивости [5], разработки диагностических моделей и их описания [6] и т.д.) и зарубежными исследователями (например, в области проектирования систем с заданными показателями надежности [7], построения распределенных систем управления [8], применения современных "полевых" технологий управления [9] и др.). При этом сохраняется актуальность задач построения адекватных диагностических моделей с учетом специфики объекта контроля — элемента системы управления, а также выбора математического аппарата для ее описания. Это позволяет разработать и реализовать в автоматизированной системе диагностирования методы и алгоритмы оценки технического состояния элементов систем управления.

Анализ элементов систем управления как объектов диагностирования

Выделим два класса РИС, которые оказывают наиболее существенное влияние на широкий спектр показателей технологических систем: *системы автоматизации и управления* (САУ) и *инфокоммуникационные системы* (ИКС). Для САУ профильными задачами являются автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, для ИКС — предоставление и управление качеством информационных и телекоммуникационных услуг. Для управления указанными классами РИС используются соответствующие СУ — для САУ это *информационно-управляющие системы* (ИУС), для ИКС — *системы управления и мониторинга* (СУМ) [10].

Оба указанных класса систем управления могут быть описаны обобщенными компонентной (на уровне элементов, табл. 1) и информационной (на уровне протоколов взаимодействия, табл. 2) моделями.

Адекватность моделей СУ позволяет выделить общие признаки и принять общую модель СУ РИС, которая приведена на рис. 1.

Таблица 1

Модель на уровне компонентов СУ

№	Информационно-управляющие системы САУ	№	Системы управления и мониторинга ИКС
1	Датчики, измерительные преобразователи, исполнительные механизмы	1	Терминальное оборудование, модули, платы канальных окончаний
2	Контроллеры, промышленные компьютеры	2	Устройства контроля и сигнализации в составе коммуникационной аппаратуры, устройства связи с объектом
3	Диспетчерские пульты, щиты, программное обеспечение оператора (SCADA)	3	Менеджер системы управления и мониторинга производителя
4	Системы управления базами данных, удаленный доступ (Web)	4	Менеджер мультивендорной интегрированной системы управления и мониторинга

Таблица 2

Модель на уровне протоколов СУ

ИУС		СУМ	
1—2	Fieldbus (LON, CAN, Profibus, Modbus, Industrial Ethernet)	1—2	Сервисные каналы управления (встроенные или выделенные)
2—3	ЛВС (Ethernet, HDLC, TCP/IP)	2—3	Протоколы и интерфейсы СУ (Ethernet, HDLC, TCP/IP, SNMP, CMIP)
3—4	Интернет, СУБД, удаленный доступ к ресурсам	3—4	Интернет, СУБД, удаленный доступ к ресурсам

В системе управления (рис. 1) информация об *объектах автоматизации* передается от *первичных информационных преобразователей* (ПИПр) через *программируемые локальные контроллеры* (ПЛК) и *аппаратуру передачи данных* (АПД) в *программное обеспечение верхнего уровня* (SCADA). Информация от *объектов связи и передачи данных* передается через *устройства контроля и сигнализации* (КС) по *локальной сети управления и мониторинга* (ЛСУиМ), затем через *служебный сервисный канал* (ССК) *транспортной сети управления и мониторинга* (ТСУиМ), формируемый *модулем внешних стыков* (ВС) *цифрового потока*, в *программное обеспечение менеджера системы управления и мониторинга* (ПО СУМ). Информация может быть передана через *базу данных* (БД) и *глобальную* (Интернет) или *локальную* (Интранет) *сети* удаленным администраторам или операторам. *Система диагностирования* может быть реализована в виде отдельной подсистемы или интегрирована с ПО СУМ.

В работе решается задача построения диагностических моделей, алгоритмов и методов оценки состояния элементов систем управления 2-го уровня компонентной модели как основных

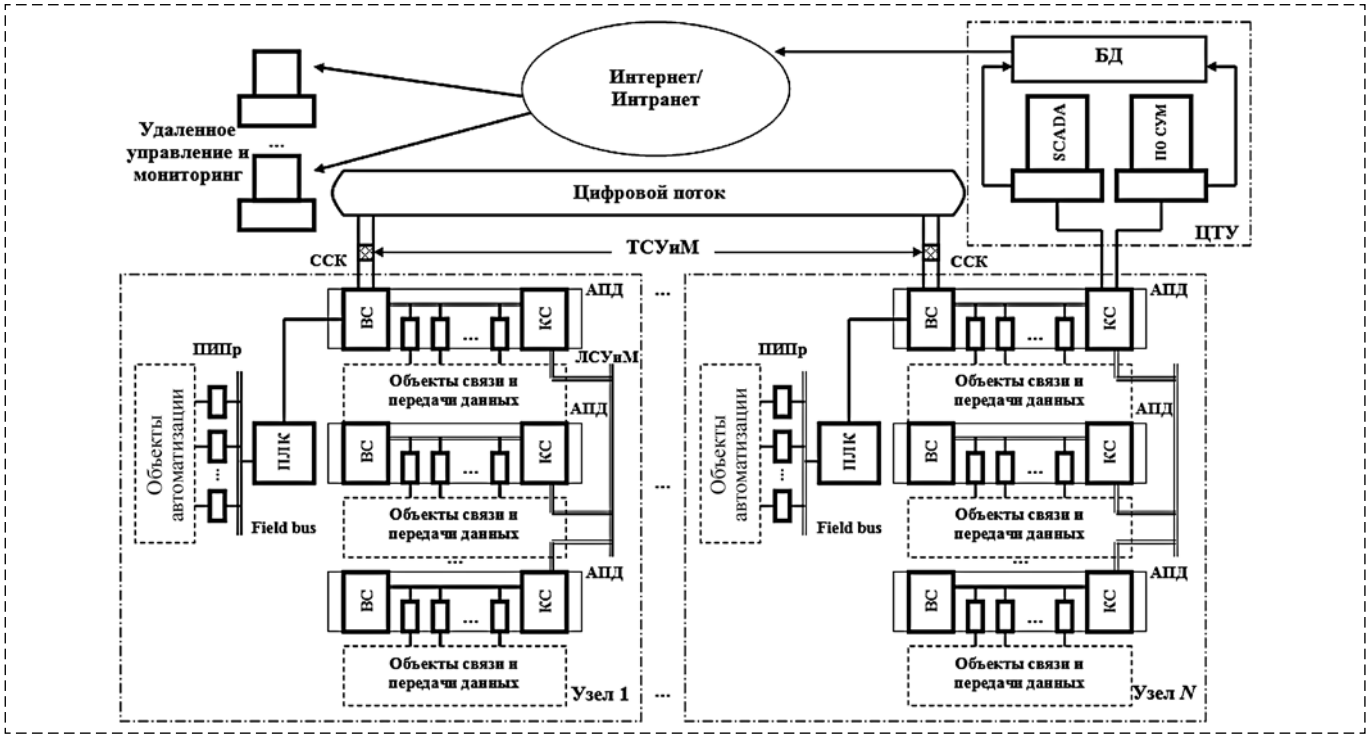

Рис. 1. Модель системы управления распределенной инфраструктурой

элементов с точки зрения распространенности и участия в процессах сбора, передачи и распределения информации.

Диагностические модели элементов систем управления

Для эффективной реализации процедур контроля необходимо построить адекватную диагностическую модель выбранного объекта контроля [11]. Для решения разных задач проверки работоспособности предлагается строить *обобщенную* или *детализированную* диагностические модели. *Обобщенная диагностическая модель* проверки работоспособности позволяет получить *агрегированную* информацию об объекте и его компонентах и их техническом состоянии в целом. Для этого выделяются следующие варианты *статуса* объекта:

- *исправное*: объект доступен для контроля, нет сообщений о неисправностях его компонентов;
- *авария*: показывает несоответствие параметра заданным пороговым значениям ("коэффициент ошибок больше 10^{-3}"), неисправность элемента ("не отвечает микроконтроллер") и т.п.;
- *состояние*: возможно возникновение аварии ("увеличился ток накачки лазера") или информационное сообщение ("поднята трубка микротелефона");
- *нет связи*: объект недоступен для контроля, нарушен интерфейс взаимодействия между объектом и менеджером системы управления.

Предлагается следующая иерархическая структура компонентов диагностической модели:

- *модуль* (элементарная структура, неделимый объект контроля: физическое устройство (процессор, контроллер, узел, порт и т.п.) или виртуальная структура (поток, канал, стык и т.п.));
- *плата* (совокупность модулей, тоже может быть неделимым объектом контроля);
- *блок* (функциональное устройство, состоит из плат);
- *узел* (сосредоточенная структура, содержит несколько блоков, объединенных в локальную сеть);
- *подсеть* (распределенная структура, содержит несколько узлов);
- *сеть* (распределенная инфраструктура).

Указанным выше статусом может обладать объект каждого уровня иерархии. Методы и алгоритмы определения статуса объектов будут предложены ниже.

Детализированная диагностическая модель проверки работоспособности позволяет определить причину возникновения того или иного статуса объекта по *сообщениям о неисправностях*, формируемым объектами нижележащего уровня иерархии. Такие сообщения обычно привязаны к неделимым объектам контроля (модулям (потокам, стыкам) или платам). Например, для *цифрового потока* данных выделяют следующие виды сообщений о неисправностях: LOS (потеря сигнала); LOF (потеря цикловой синхронизации); LOM (потеря сверхцикловой синхронизации); AIS (сигнал индикации аварийного состояния); RDI (индикация аварии на удаленном конце — извещение) и т.п. Отметим, что каждое сообщение о неисправности может быть классифицировано как авария или состояние в зависимости от сущности, значимости, последствий и т.д. В качестве иллюстрации к сообщениям о неисправности по *плате* можно указать следующие примеры: ошибка конфигурации; включение шлейфа; предавария лазера; работа от аккумуляторов; переход на резервный источник синхросигнала; вызов по служебной связи и т.п. При анализе объектов более высокого уровня иерархии представляется, например в виде отчета, детализированная информация по составляющим их неделимым объектам контроля.

Каждый физический объект (плата или блок) описывается структурой, в которой отражается техническая информация о нем. По запросу от менеджера или по собственной инициативе объект формирует информацию о своем техническом статусе (будем использовать этот термин вместо термина "техническое состояние"), например, в таком формате:

Начало	Адрес	Поле управления	Сообщение 1	Сообщение 2	...	Сообщение *N*	Конец

Структура сообщения (на примере блока):

№ платы	Тип платы	Тип сообщения	Код сообщения

Информация может быть использована:

- для индикации на самом блоке (например, в плате (статус компонентов платы или самой платы) или в специальном модуле контроля и сигнализации (статус блока));
- для индикации в специальном устройстве (транспаранте);
- для передачи, обработки и представления в менеджере СУ.

Математическое описание диагностических моделей на основе методов теории графов

Для математического описания диагностической модели проверки работоспособности предпочтительно использование двоичной логики. Это объясняется тем, что обрабатывается элементарное событие — наличие или отсутствие конкретного сообщения о неисправности или конкретного статуса блока. При этом в соответствии

с принятой иерархией после установления статуса объектов *i*-го уровня начинается процесс обработки и принятия решения по статусу объектов (*i* + 1)-го уровня.

Для определения и индикации технического статуса объектов на уровне *физических элементов и устройств* (модуль, плата и блок) выделяются следующие возможные варианты (размерность *обобщенной диагностической модели* равна 3, что подчеркивает ее компактность, но при этом низкую иллюстративность):

- И: исправен — нет аварий и состояний (ни по одному компоненту нет сообщений об авариях или состояниях);
- А: авария (у хотя бы одного из компонентов фиксируется хотя бы одна авария);
- С: состояние (у хотя бы одного из компонентов фиксируется хотя бы одно состояние, но ни одной аварии нет).

Для обработки, отображения, хранения и представления информации в *менеджере* список технических состояний расширяется за счет того, что полученные, просмотренные и проанализированные оператором сообщения могут быть *квитированы* (*отложены*, *учтены*), чтобы на их фоне можно было определить новые сообщения (размерность *детализированной диагностической модели* равна 9), и включает следующие варианты:

- нет информации;
- нет ответа;
- квитированный (отложенный) статус "нет ответа";
- нет аварий и состояний;
- состояние (есть новое или новые состояния);
- квитированный (отложенный) статус "состояние" (все состояния просмотрены и квитированы);
- авария (есть новое или новые аварии);
- квитированный (отложенный) статус "авария" (все аварии просмотрены и квитированы);
- новое состояние на фоне отложенных аварий.

Переходы между разными вариантами технического статуса могут быть описаны с помощью методов *теории графов*. Для иллюстрации общего подхода построим *нагруженный ориентированный граф переходов* (рис. 2) работы элемента системы управления (платы контроля и сигнализации) в составе коммуникационного оборудования (блока).

В соответствии с предложенной *обобщенной диагностической моделью* определяется технический статус объекта данного диагностирования на основании данных о контролируемых объектах (модулях и платах данного блока) и отображается, например, на встроенных средствах визуальной индикации.

Для процесса обработки информации в менеджере системы управления граф переходов усложняется за счет расширения списка возможных

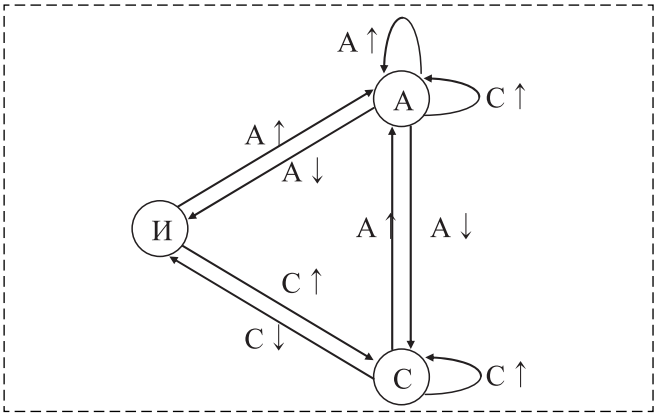

Рис. 2. Граф переходов процесса определения статуса блока (↑ — появление аварии или состояния; ↓ — устранение аварии или состояния)

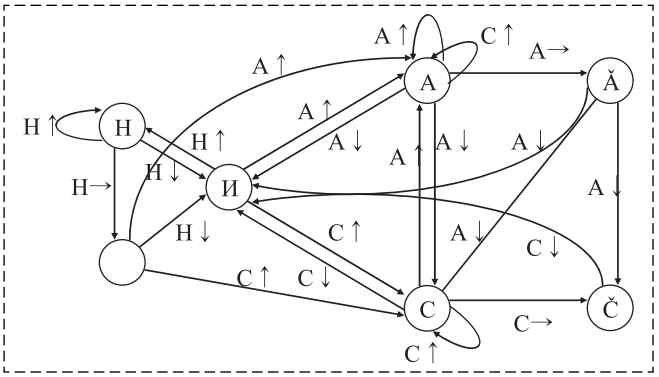

Рис. 3. Граф переходов процесса определения статуса блока аппаратуры передачи данных (↑ — появление аварии или состояния; ↓ — устранение аварии или состояния; → — квитирование аварии или состояния)

состояний, связанных с *квитированием* информации, *отсутствием связи* с объектом и т.п. Пример фрагмента такого графа приведен на рис. 3.

Построенные графы используются для разработки и реализации алгоритмов принятия решения по каждому уровню иерархической структуры диагностической модели.

Алгоритм определения состояния элемента системы управления

На основании анализа графов переходов для процессов определения технического статуса объектов всех уровней иерархии разработаны и реализованы алгоритмы принятия решения в соответствующих функциях программного обеспечения менеджера системы управления. Были построены и реализованы *алгоритмы* определения статуса платы, блока, узла, подсети и всей сети в целом. Для этого был использован *расширенный* список технических состояний (с учетом квитирования). Приведем в качестве иллюстрации алгоритм определения статуса платы контроля и сигнализации (рис. 4).

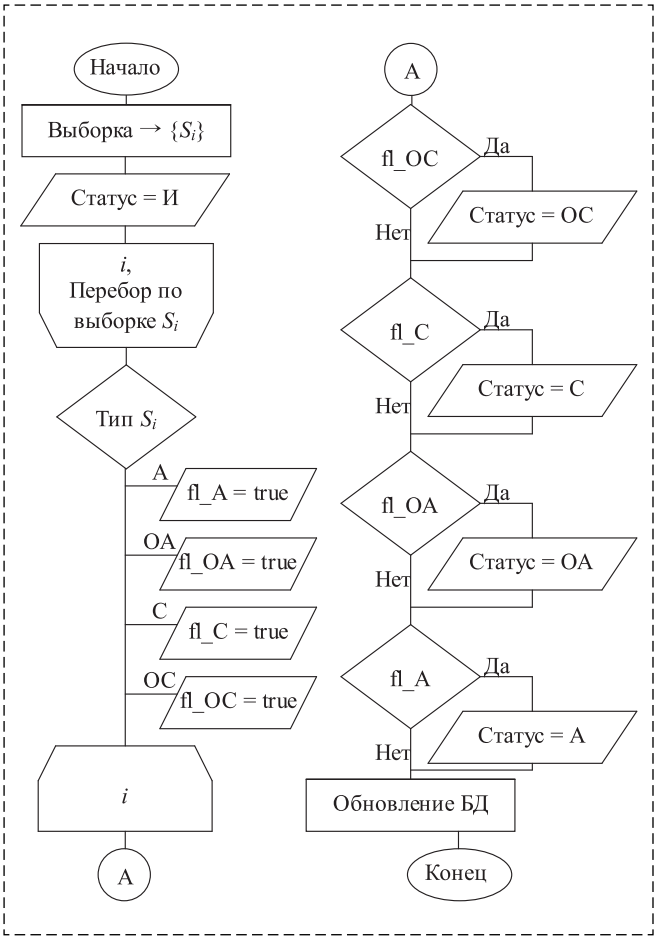

Рис. 4. Схема алгоритма принятия решения о статусе устройства (платы КС)

Таблица 3

Таблица формирования условий

№	Значения флагов статуса				Статус платы
	fl_A	fl_OA	fl_C	fl_OC	
1	0	0	0	0	И
2	1	—	—	—	А
3	0	1	0	—	ОА
4	0	1	1	—	ОАС
5	0	0	1	—	С
6	0	0	0	1	ОС

Для реализации алгоритма была построена таблица формирования условий (табл. 3) в зависимости от статуса *флагов* (fl) появления того или иного сообщения. Условные обозначения: "1" — истина (true); "0" — ложь (false); "—" — не имеет значения.

Для вышележащих уровней иерархии алгоритмы и таблицы принятия решения строятся аналогично, с учетом того, что число состояний расширяется за счет добавления событий "нет связи" и его квитирования.

Для повышения иллюстративности в программном обеспечении менеджера (карта сети) используется *графическая интерпретация* разных статусов. Приведем пример для разработанного программного обеспечения менеджера ИУС КПО-01 (рис. 5, см. вторую сторону обложки) распределенной информационно-технической инфраструктуры, построенной на промышленной коммуникационной аппаратуре производства ПАО "Морион" (г. Пермь) [12].

На рис. 5, *а* (см. вторую сторону обложки) показана карта сети с безаварийным состоянием всех узлов. На рис. 5, *б* по каждому узлу имеются сообщения о неисправностях, детализированные на следующих рисунках: рис. 5, *в* — состояние; рис. 5, *г* — квитированная авария; рис. 5, *д* — срочная авария; рис. 5, *е* — отсутствие связи с элементом.

Методика расчета основных эксплуатационно-технических показателей систем управления

Адекватные диагностические модели, эффективные алгоритмы тестового диагностирования, методы дешифрации и способы количественной оценки результатов контроля позволяют улучшить *основные эксплуатационно-технические показатели* элементов систем управления. Для рассматриваемого класса информационно-технических систем это коэффициенты *готовности*, *технического использования* и *простоя*, характеризующие вероятности нахождения элемента или всей системы в работоспособном (без учета времени технического обслуживания и восстановления), работоспособном (с учетом времени технического обслуживания и восстановления) и неработоспособном состояниях соответственно.

Для построения методики оценки влияния показателей системы диагностирования на эксплуатационно-технические показатели системы управления и ее элементов предлагается использовать "классический" подход теории надежности [1, 2, 11], но адаптировать его для выбранного класса объектов диагностирования — элементов систем управления. Основные этапы методики:

1. Определяются и описываются n состояний объекта диагностирования S_i (элемента, подсистемы, системы управления).

2. Строится диагностическая модель (например, в виде марковской цепи), задаются характеристики переходов q_{ij}.

3. Строится система дифференциальных уравнений вида для расчета финальных вероятностей нахождения объекта в каждом из состояний $P'_j(t)$:

$$P'_j(t) = \sum_{i=1}^{n} P_i(t) q_{ij}, j \in [1; n]. \quad (1)$$

4. Принимается гипотеза, что марковский процесс является стационарным, и финальные вероятности считаются постоянными. Поэтому строится система алгебраических уравнений, которая разрешается относительно P_j.

5. Определяются основные эксплуатационно-технические показатели, такие как коэффициент готовности $K_г$, коэффициент технического использования $K_{ти}$, коэффициент простоя $K_п$ и др.

Проиллюстрируем предлагаемую методику на примере анализа СУ.

1. Выделим и опишем следующие состояния объекта диагностирования:

S_1 — объект находится в рабочем режиме;

S_2 — объект находится в предусмотренном регламентом режиме диагностирования (технического обслуживания);

S_3 — объект неработоспособен (неисправен, неправильно функционирует) и находится в рабочем режиме;

S_4 — объект находится в режиме восстановления (поиск неисправностей, ремонт, замена, проверка качества проведенных работ и т.п.).

2. Для построения графа переходов марковского процесса (рис. 6) введем обозначения состояний S_i и характеристики переходов q_{ij}:

S_1 — Р; S_2 — Д; S_3 — Н; S_4 — В;

λ — переходы в неработоспособное состояние (из рабочего состояния S_1 $q_{13} = \lambda_и$; из состояния диагностирования S_2 $q_{23} = \lambda_д$);

μ — переходы в рабочее состояние (из состояния диагностирования S_2 $q_{21} = \mu_д$; из состояния восстановления S_4 $q_{41} = \mu_в$);

γ — переходы в состояние диагностирования или восстановления (из рабочего состояния S_1 $q_{12} = \gamma_и$; из неработоспособного состояния S_3 $q_{34} = \gamma_н$).

3, 4. Строим систему уравнений с учетом стационарности процесса:

$$\mu_д P_д + \mu_в P_в - (\lambda_и + \gamma_и) P_р = 0;$$
$$\gamma_и P_р - \mu_д P_д = 0;$$
$$\lambda_и P_р + \lambda_д P_д - \gamma_н P_н = 0;$$
$$\gamma_н P_н - \mu_в P_в = 0;$$
$$P_р + P_д + P_н + P_в = 1$$

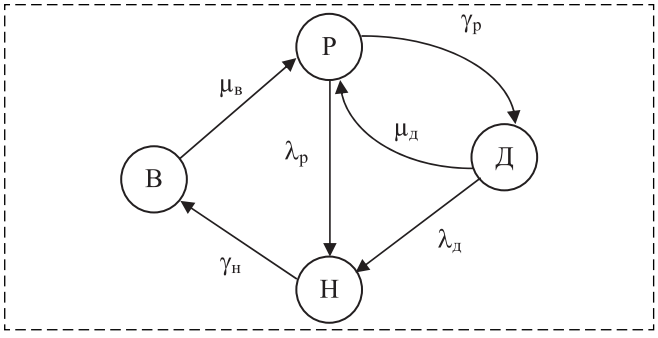

Рис. 6. Граф переходов

($P_р$, $P_д$, $P_н$, $P_в$ — вероятности нахождения в режимах работоспособности, диагностирования, неисправности, восстановления соответственно).

Решаем систему уравнений:

$$P_д = (\gamma_и P_р)/\mu_д;$$
$$P_н = (\lambda_и P_р)/\gamma_н;$$
$$P_в = (\lambda_и P_р)/\mu_в;$$
$$P_р + P_д + P_н + P_в = P_р + (\gamma_и P_р)/\mu_д + (\lambda_и P_р)/\gamma_н + (\lambda_и P_р)/\mu_в = P_р(1 + \gamma_и/\mu_д + \lambda_и/\gamma_н + \lambda_и/\mu_в) = 1.$$

Отсюда определим выражение для вероятности $P_р$, а через нее — и для всех остальных:

$$P_р = 1/(1 + \gamma_и/\mu_д + \lambda_и/\gamma_н + \lambda_и/\mu_в) = (\mu_д\gamma_н\mu_в)/(\mu_д\gamma_н\mu_в + \gamma_и\gamma_н\mu_в + \mu_д\lambda_и\mu_в + \mu_д\gamma_н\lambda_и) = (\mu_д\gamma_н\mu_в)/(\gamma_н\mu_в(\mu_д + \gamma_и) + \mu_д\lambda_и(\mu_в + \gamma_н));$$

$$P_д = (\gamma_и\gamma_н\mu_в)/(\gamma_н\mu_в(\mu_д + \gamma_и) + \mu_д\lambda_и(\mu_в + \gamma_н));$$

$$P_н = (\lambda_и\mu_д\mu_в)/(\gamma_н\mu_в(\mu_д + \gamma_и) + \mu_д\lambda_и(\mu_в + \gamma_н));$$

$$P_в = (\lambda_и\mu_д\gamma_н)/(\gamma_н\mu_в(\mu_д + \gamma_и) + \mu_д\lambda_и(\mu_в + \gamma_н)).$$

Интенсивности переходов определяются как обратные величины к усредненным временным характеристикам процесса:

$\lambda_и = 1/T_о$, где $T_о$ — наработка на отказ объекта в рабочем режиме;

$\lambda_д = 1/T_п$, где $T_п$ — время проверки объекта и выявления дефектов в режиме диагностирования;

$\mu_д = 1/T_р$, где $T_р$ — время перевода объекта в рабочий режим из режима диагностирования;

$\mu_в = 1/T_в$, где $T_в$ — время восстановления объекта;

$\gamma_и = 1/T_д$, где $T_д$ — период проведения регламентных работ с объектом;

$\gamma_н = 1/T_н$, где $T_н$ — время перевода объекта в режим восстановления из режима неисправного состояния.

5. Определим основные эксплуатационно-технические показатели:

$$K_г = P_р + P_д;\ K_{ти} = P_р;$$
$$K_п = 1 - K_г = 1 - (P_р + P_д) = P_н + P_в.$$

С учетом полученных соотношений можно на разных этапах (проектирование, эксплуатация, прогнозирование, сравнительный анализ и т.п.) оценить влияние одного или нескольких показателей системы диагностирования на основные эксплуатационно-технические показатели элементов системы управления. Для этого разрабатывается и проходит апробацию программный инструментарий.

Оценка влияния показателей процедур диагностирования на эксплуатационно-технические показатели элементов систем управления

Как было показано выше, основные эксплуатационно-технические показатели элементов систем управления определяются показателями безотказности и восстанавливаемости.

Основным показателем *безотказности* является наработка на отказ — для элемента эта характеристика задается производителем и указывается в паспорте (технических условиях). Для всей системы показатели безотказности определяются на основе анализа ее структуры (расчет по эквивалентной схеме [2] замещения или графу марковской цепи [2]). Повысить их значения можно путем выбора более надежного оборудования или путем резервирования.

Показатели *восстановления* характеризуются средним временем восстановления объекта, которое зависит от нескольких факторов (поиск и определение характера неисправности, возможность ремонта или замены, время доступа к объекту, проверка качества восстановительных работ и т.п.). Выделим основные этапы процесса восстановления после неисправности.

1. Подготовка и реализация тестов поиска (тестовое диагностирование).
2. Организация дополнительных измерений.
3. Анализ результатов диагностирования (логфайлов, отчетов и т.п.).
4. Принятие решения (определение места и характера неисправности).
5. Выполнение корректирующих действий (доступ, ремонт, замена, реконфигурация, проверка качества восстановления).

В процедуре восстановления основные задачи выполняет *система диагностирования* (отдельно реализованная либо интегрированная с системой управления и мониторинга), которая позволяет оперативно выявить неисправности, пока не приводившие к отказу, например, за счет углубленного тестирования или прогнозирования. Среднее время, эффективность и точность диагностирования также являются значимыми параметрами для повышения надежности систем управления. Как правило, указанные задачи решаются во время проведения регламентных работ по проверке правильности функционирования, для чего должна быть построена и реализована адекватная диагностическая модель. Выделим основные этапы диагностирования.

1. Подготовка и реализация тестов проверки правильности функционирования (тестирование).
2. Сбор и промежуточное хранение результатов тестирования.
3. Обработка, дешифрация и оценка результатов тестирования.
4. Принятие решения о показателях функционирования элементов СУ.

Средства и инструменты, которые необходимы для проведения процедур диагностирования: специалист-диагност, система управления и мониторинга, система диагностирования, измерительная техника, экспертная система (указанные функции могут быть совмещены аппаратно или программно).

Пример реализации методики оценки влияния показателей диагностирования системы на ее эксплуатационно-технические показатели

В заключение приведем пример расчета и оценки влияния показателей диагностирования

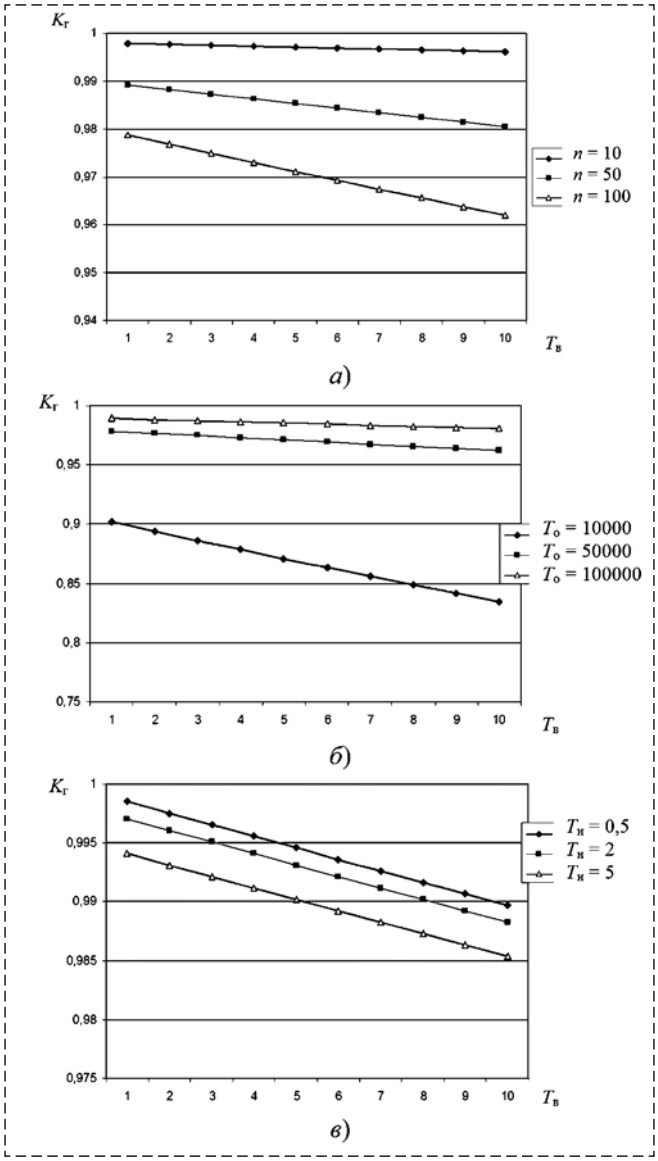

Рис. 7. Оценка влияния среднего времени восстановления на значение $K_г$ при разных характеристиках системы управления: *а* — числе элементов; *б* — средней наработке на отказ; *в* — среднем времени поиска неисправности

на основные эксплуатационно-технические показатели элементов системы управления: $K_г = f(T_в)|_{n = \text{const}}$ (рис. 7, *а*); $K_г = f(T_в)|_{T_о = \text{const}}$ (рис. 7, *б*); $K_г = f(T_в)|_{T_н = \text{const}}$ (рис. 7, *в*).

Из анализа рис. 7 можно сделать вывод, что влияние показателей диагностирования для разных параметров имеет разный характер: при увеличении числа сетевых элементов n (рис. 7, *а*) и ухудшении наработки на отказ $T_о$ (рис. 7, *б*) оно усиливается (увеличивается производная, характеризующаяся углом наклона прямой), а для среднего времени поиска неисправности $T_н$ — остается практически неизменным (рис. 7, *в*).

Предложенная методика и инструментарий моделирования позволяют проводить синтез и анализ систем управления распределенными инфраструктурами, варьируя показатели надежности элементов и структуры в целях достижения заданных (требуемых) значений основных эксплуатационно-технических показателей.

Заключение

В работе представлены результаты решения следующих задач диагностирования и оценки состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами.

1. Показана актуальность проблемы обеспечения эксплуатационно-технических элементов систем управления. Проведен краткий обзор публикаций отечественных и зарубежных исследователей в рассматриваемой предметной области. Выделены направления, в которых продолжаются исследования, результаты которых приведены в работе.

2. Построены и исследованы обобщенная и детализированная диагностические модели для проверки работоспособности элементов систем управления, в рамках которых реализовано иерархическое представление структуры объекта диагностирования на уровне компонентов разных уровней. Разработана математическая модель в виде ориентированных графов переходов между техническими состояниями для объектов разных уровней диагностических моделей. На основе графов спроектированы и реализованы в программном обеспечении системы управления промышленной коммуникационной аппаратурой алгоритмы обработки и представления диагностической информации, приведена их графическая иллюстрация.

3. Предложена методика расчета основных эксплуатационно-технических показателей элементов систем управления. Показано, как на значения основных показателей оказывают влияние показатели методов и процедур диагностирования. Проанализировано влияние показателей разных процедур диагностирования на эксплуатационно-технические характеристики элементов систем управления распределенными инфраструктурами, даны рекомендации по их практическому применению.

Список литературы

1. **Кон Е. Л., Кулагина М. М.** Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 310 с.

2. **Тюрин С. Ф.** Надежность систем автоматизации. Пермь: Изд-во Перм. национ. исслед. политехн. ун-та, 2012. 191 с.

3. **Твердохлебов В. А.** Задачи контроля и диагностирования в управлении функционированием крупномасштабных систем // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016: Материалы Девятой международной конференции: в 2-х томах. Под общей редакцией С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. 2016. С. 245—247.

4. **Гришин В. Ю., Лобанов А. В., Сиренко В. Г.** Функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 1. С. 154—160.

5. **Каравай М. Ф., Пархоменко П. П., Подлазов В. С.** Универсальная сетевая структура для отказоустойчивых многопроцессорных систем реального времени // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: материалы конференции с международным участием. ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН. 2010. С. 583—597.

6. **Верещака В. А., Густомясов А. Н., Зимин В. В.** Диагностические модели технических систем // Инженерный вестник. 2015. № 3. 5 с.

7. **Aminifar A., Eles P., Peng Z., Cervin A.** Control-quality driven design of cyber-physical systems with robustness guarantees // In Design, Automation and Test in Europe (DATE). 2013.

8. **Lian F.-L., Moyne J., Tilbury D.** Network design consideration for distributed control systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. Vol. 10, Iss. 2. P. 297—307.

9. **Miśkowicz M.** Access delay in LonTalk MAC protocol // Computer Standards & Interfaces. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. P. 548—556.

10. **Гаврилов А. В., Кон Е. Л., Фрейман В. И.** Системы управления телекоммуникационных систем информационно-вычислительных сетей. Стандарты, модели, протоколы: учеб. пособие для вузов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2005. 101 с.

11. **Гуменюк В. М.** Надежность и диагностика электротехнических систем. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. 218 с.

12. **Фрейман В. И.** Применение методов автоматизации при построении программно-аппаратных лабораторных стендов по изучению элементов и устройств промышленных информационно-управляющих и телекоммуникационных систем // Дистанционное и виртуальное обучение. 2017. № 4. С. 102—109.

Diagnosis and Assessment of Elements Condition of Control Systems for Distributed Infrastructures

V. I. Freyman, vfrey@mail.ru✉, **A. A. Yuzhakov,** uz@at.pstu.ru,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Corresponding author: **Freyman Vladimir I.,** Ph. D., Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation,
e-mail: vfrey@mail.ru

Accepted on November 10, 2017

The article is devoted to the task of condition analysis of control systems for distributed infrastructures based on technical diagnostics and reliability theory procedures and methods. The urgency of the problems to be solved is substantiated, a brief review of scientific publications in this field is carried out, and directions that require further research are analyzed. The concept of "distributed infrastructure", integrating the automation, control, communication and data transmission subsystems within the technological systems is introduced. The model of distributed infrastructure control system is designed, the main processes of its functioning are described. The analysis of elements models of control systems for distributed infrastructure at the component level and interconnection protocols is executed. The diagnostic object is selected, its properties and characteristics are analyzed. A generalized and detailed diagnostic models of the control systems elements are proposed, their mathematical description using the methods of graph theory is performed. An approach to the development of algorithms for estimating the condition of control systems elements is shown, an example is given, and the results of their practical implementation are shown. The method for calculating and analyzing operational and technical parameters of control systems elements based on methods of reliability theory is proposed. The influence of indicators of diagnosis and checking different stages on the operational and technical parameters of the control systems elements is estimated, an example of the use of the proposed method with using the software modeling tool is given. Conclusions on the results of this paper are made, recommendations on their practical application are offered.

Keywords: *control systems, operational and technical indicators, reliability, model, graph, diagnosis, recovery*

For citation:

Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Diagnosis and Assessment of Elements Condition of Control Systems for Distributed Infrastructures, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2018, vol. 19, no. 2, pp. 86—94.

DOI: 10.17587/mau.19.86-94

References

1. **Kon E. L., Kulagina M. M.** *Nadezhnost' i diagnostika komponentov infokommunikacionnyh i informacionno-upravljajushhih sistem* (The reliability and diagnostics of infocommunication and information and control systems components), Perm, Publishing house of Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2011, 310 p. (in Russian).

2. **Tjurin S. F.** *Nadezhnost' sistem avtomatizacii* (The reliability of automation systems), Perm, Publishing house of Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2012, 191 p. (in Russian).

3. **Tverdohlebov V. A.** *Zadachi kontrolja i diagnostirovanija v upravlenii funkcionirovaniem krupnomasshtabnyh sistem* (The testing and diagnostics tasks for management of large-scale system functioning), *Upravlenie Razvitiem Krupnomasshtabnyh Sistem* MLSD'2016, 2016, pp. 245—247 (in Russian).

4. **Grishin V.Ju., Lobanov A. V., Sirenko V. G.** *Funkcional'noe diagnostirovanie v raspredelennom sistemnom diagnostirovanii mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistem* (A distributed functional diagnostic system for multi-computer systems), *Avtomatika i Telemehanika*, 2002, no. 1, pp. 154—160 (in Russian).

5. **Karavaj M. F., Parhomenko P. P., Podlazov V. S.** *Universal'naja setevaja struktura dlja otkazoustojchivyh mnogoprocessornyh sistem real'nogo vremeni* (An universal network structure for fault-tolerant real-time microprocessor systems), *Tehnicheskie i Programmnye Sredstva Sistem Upravlenija, Kontrolja i Izmerenija*, 2010, pp. 583—597 (in Russian).

6. **Vereshhaka V. A., Gustomjasov A. N., Zimin V. V.** *Diagnosticheskie modeli tehnicheskih sistem* (Diagnostic models of technical systems), *Inzhenernyj Vestnik*, 2015, no. 3, 5 p. (in Russian).

7. **Aminifar A., Eles P., Peng Z., Cervin A.** Control-quality driven design of cyber-physical systems with robustness guarantees, *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, 2013, 6 p.

8. **Lian F.-L., Moyne J., Tilbury D.** Network design consideration for distributed control systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, vol. 10, iss. 2, pp. 297—307.

9. **Miśkowicz M.** Access delay in LonTalk MAC protocol, *Computer Standards & Interfaces*, Nederland, Elsevier Science Publishing Company, 2009, pp. 548—556.

10. **Gavrilov A. V., Kon E. L., Frejman V. I.** *Sistemy upravlenija tele-kommunikacionnyh sistem informacionno-vychislitel'nyh setej. Standarty, modeli, protokoly* (The control systems of telecommunication systems of networks. Standards, models, protocol), Perm, Publishing house of Perm. gos. tehn. un-ta, 2005, 101 p. (in Russian).

11. **Gumenjuk V. M.** *Nadezhnost' i diagnostika jelektrotehnicheskih system* (The reliability and diagnostics of the electrotechnical systems), Vladivostok Publishing house of Dal'nevost. gos. tehn. un-ta, 2010, 218 p. (in Russian).

12. **Frejman V. I.** *Primenenie metodov avtomatizacii pri postroenii programmno-apparatnyh laboratornyh stendov po izucheniju jelementov i ustrojstv pro-myshlennyh informacionno-upravljajushhih i telekommunikacionnyh sistem* (The application of automation methods for designing the hardware-software laboratory stands for studying the elements and devices of industrial information and control systems and telecommunication networks), *Distancionnoe i Virtual'noe Obuchenie*, 2017, no. 4 (118), pp. 102—109 (in Russian).