

## УПРАВЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАЛООБСЛУЖИВАЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С.

НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»

nazakharov@npp-dozor.ru, viklepikov@mail.ru, dspodkhvatilin@npp-dozor.ru

*Аннотация. Предложен подход к управлению конфигурацией распределенной системы управления, имеющей в своем составе избыточные компоненты. Подход основан на формализованном векторно-матричном представлении наборов компонентов системы, возможных системных конфигураций и функциональных связей между ними.*

Ключевые слова: распределенная система управления, синхронно-временной протокол, управление конфигурацией, оценка достоверности.

### Введение

Развитие распределенных систем управления (РСУ) на современном этапе ведет к созданию моделей комплексной автоматизации процессов и производств с автоматическим без участия персонала реконфигурированием своей структуры с целью продолжения нормального функционирования при возникновении отказов и сбоев в их компонентах. РСУ с цифровыми каналами связи может быть представлена как совокупность совместно и целенаправленно

функционирующих распределенных динамических объектов и, в соответствии с современной теорией систем, классифицируется как сложная динамическая система.

В настоящее время является перспективной концепция построения РСУ на основе необслуживаемой модульной электроники (НМЭ) [1]. Данная концепция подразумевает наличие в системе следующих компонентов:

- коммуникационной сети;
- компонентной избыточности оборудования;
- развитой системы сбора и обобщения информации о функционировании оборудования;
- высокопроизводительных алгоритмов обнаружения и локализации наблюдаемых и ненаблюдаемых сбоев и отказов;
- алгоритмов глубокой реконфигурации системы на основе компонентной избыточности функциональных систем и коммуникационной сети.

Для парирования отказов в РСУ наиболее перспективным путем является применение избыточности ресурсов системы. В общем случае выделяются следующие виды избыточности:

- системная – резервирование отдельных компонентов и подсистем;
- структурная (архитектурная) – адаптивная реконфигурация структуры системы;
- информационная – добавление к основному сигналу информации, по которой можно проверить его достоверность (контрольная сумма в канале связи, оценки по модели в динамических системах управления и регулирования);
- энергетическая – применение избыточных для нормального режима эксплуатации источников энергии, которые могут быть востребованы в критических ситуациях;
- коммуникационная – использование дублированных и разнотипных каналов связи;
- алгоритмическая – использование различных алгоритмов для решения одних и тех же задач;
- программная – применение различных программных средств;
- технологическая – использование разнообразных программных, информационных и других технологий;
- эксплуатационная – применение элементов с повышенным эксплуатационным ресурсом;
- нагрузочная – применение элементов с повышенной нагрузочной способностью для работы в режимах пониженных нагрузок;
- временная – повторное выполнение операций с последующей обработкой результатов;
- семантическая – использование избыточных смысловых конструкций, цифровых образов контролируемых параметров;
- организационная – использование дополнительных систем или подсистем, дублирующих функции или информационные потоки основной системы.

Для построения коммуникационной сети перспективным решением является применение синхронно-временного протокола (СВП) [2]. Сетевая распределенная архитектура системы управления на основе СВП обеспечивает высокий уровень аппаратной, программной, временной, коммуникационной и информационной избыточности, которую можно использовать не только для повышения надежности и отказоустойчивости системы управления, но также для повышения точности и качества регулирования и управления. Большая пропускная способность СВП канала позволяет организовать единое информационное пространство для всех узлов распределенной системы, что позволяет нескольким узлам одновременно выполнять расчеты алгоритмов управления и передавать результаты в схемы мажоритарного голосования или агрегирования данных.

Для управления избыточностью РСУ предлагается модифицированный метод супервизоров конфигурации (СК). В исходном методе [3] под СК понимаются программные и аппаратные модули, используемые для мониторинга работоспособности своей конфигурации, участия в межсупервизорном арбитраже для активизации своей конфигурации либо при победе в арбитраже, либо для параллельной работы вместе с другими конфигурациями на общий исполнительный элемент. В предложенном модифицированном методе СК определение достоверности конфигурации на основе информации об исправности входящих в нее компонент дополняется оценками достоверности работы конфигураций, формируемыми на основе анализа выходных данных конфигураций. Полученные оценки достоверности работы конфигураций используются в качестве обратной связи для получения оценок исправности образующих конфигурации компонент.

Рассмотрим РСУ, построенную на основе СВП. РСУ располагает избыточным количеством  $m$  аппаратных, программных, коммуникационных и программных компонент (ресурсов). К ресурсам в общем случае относятся:

- датчики и устройства ввода информации;
- исполнительные устройства и устройства вывода сигналов;
- вычислительные узлы (контроллеры);
- линии связи между узлами и со смежными системами;
- встроенные математические модели.

В данной системе может быть построено  $n$  вариантов коммуникационного объединения имеющихся  $m$  компонент для выполнения заданных системных функций. Каждый такой вариант объединения будем называть конфигурацией.

Различные конфигурации могут реализовывать либо разные, либо одни и те же системные функции, конфигурации могут иметь полностью не пересекающиеся наборы компонент, или могут использовать какие-то общие для них ресурсы. Разработан подход к управлению избыточностью распределенной системы, обеспечивающий:

- формализованное представление в векторно-матричном виде всех компонент, используемых конфигураций и наборов компонент, задействованных в каждой конфигурации;
- формализованную процедуру прямого вычисления вектора работоспособных конфигураций  $y$  на основе исходного вектора исправности компонент  $x$ ;
- вычисление по результатам работы конфигураций вектора оценок  $\hat{y}$  работоспособных конфигураций;
- формализованную процедуру обратного вычисления вектора оценок исправности компонент на основе вектора оценок  $\hat{y}$  работоспособных конфигураций;
- замену действующих неработоспособных конфигураций на новые, либо замену в действующих конфигурациях отказавших компонент на аналогичные исправные.

Рассмотрим работу предложенного метода на примере управления конфигурацией распределенной системы управления приводом газотурбинной установки (РСУ ГТП). Структурная схема РСУ ГТП приведена на рис. 1. В системе присутствуют  $k=46$  компонент  $c_i, i=1...46$ , которые имеют следующее функциональное назначение:

- $c_1 \dots c_5 - U_1 \dots U_5$  – контроллеры РСУ ГТП;
- $c_6, c_{12} - L_1, L_2$  – шины дублированного канала СВП;
- $c_7 \dots c_{11} - L_{11} \dots L_{15}$  – порты контроллеров  $U_1 \dots U_5$  СВП-шины  $L_1$ ;
- $c_{13} \dots c_{17} - L_{21} \dots L_{25}$  – порты контроллеров  $U_1 \dots U_5$  СВП-шины  $L_2$ ;
- $c_{18} - L_3$  – канал связи контроллера  $U_5$  с САУ верхнего уровня;
- $c_{19}, c_{32} - N_{11}, N_{12}$  – основной и дублирующий датчики частоты вращения компрессора низкого давления (КНД);
- $c_{20}, c_{33} - N_{21}, N_{22}$  – основной и дублирующий датчики частоты вращения компрессора высокого давления (КВД);
- $c_{21}, c_{34} - N_{31}, N_{32}$  – основной и дублирующий датчики частоты вращения свободной турбины (СТ);
- $c_{22}, c_{35} - T_{11}, T_{12}$  – основной и дублирующий датчики температуры воздуха;
- $c_{23}, c_{36} - P_{11}, P_{12}$  – основной и дублирующий датчики давления воздуха;
- $c_{24}, c_{37} - T_{41}, T_{42}$  – основной и дублирующий датчики температуры газов перед СТ;
- $c_{25}, c_{38} - P_{21}, P_{22}$  – основной и дублирующий датчики давления в камере сгорания;
- $c_{26}, c_{39} - Q_{11}, Q_{12}$  – основной и дублирующий датчики положения дозатора топлива;
- $c_{27}, c_{40} - Q_{21}, Q_{22}$  – основной и дублирующий датчики положения направляющих аппаратов (НА) КНД;
- $c_{28}, c_{41} - Q_{31}, Q_{32}$  – основной и дублирующий датчики положения НА КВД;
- $c_{29}, c_{42} - Z_{11}, Z_{12}$  – основной и дублирующий сигналы управления дозатором топлива;
- $c_{30}, c_{43} - Z_{21}, Z_{22}$  – основной и дублирующий сигналы управления НА КНД;
- $c_{31}, c_{44} - Z_{31}, Z_{32}$  – основной и дублирующий сигналы управления НА КВД;
- $c_{45} - T_{13}, P_{13}, N_{53}$  – информация от САУ верхнего уровня: температура и давление воздуха, уставка регулятору частоты вращения свободной турбины;
- $c_{46} - N_{14}, N_{24}, N_{34}, T_{44}, P_{24}$  – встроенная модель двигателя, вырабатывающая в реальном времени оценки частот вращения, температуры газов и давления в камере сгорания.

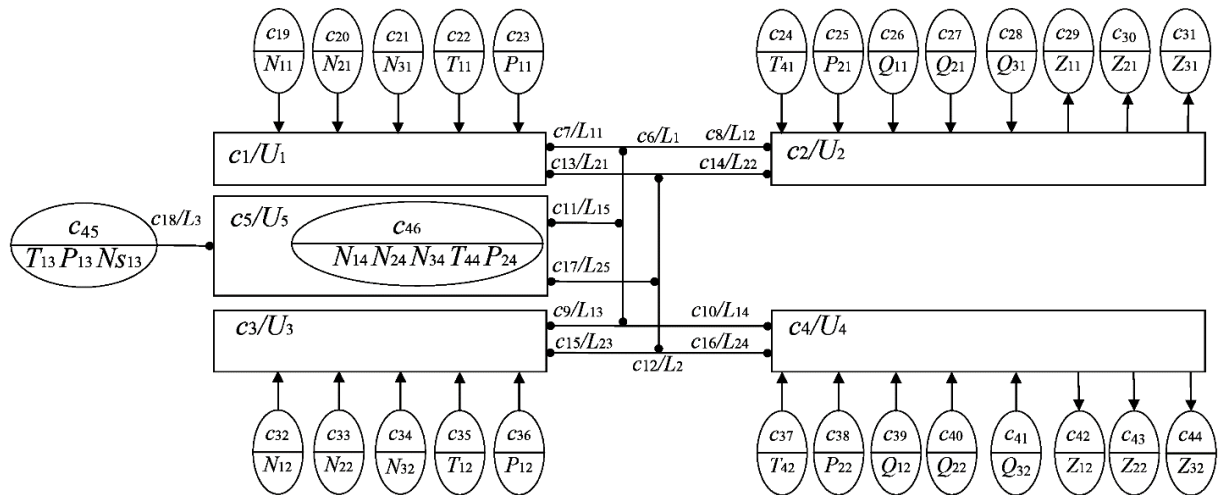


Рис. 1. Структурная схема РСУ ГТП

РСУ ГТП должна обеспечивать:

- в зависимости от текущего значения уставки частоты вращения свободной турбины ( $ns$ ) и фактических значений температуры ( $t_1$ ) и давления воздуха ( $p_1$ ) на входе в ГТП путем регулирования с помощью управляющего сигнала ( $z_1$ ) расхода топлива ( $q_1$ ) обеспечивать поддержание требуемого значения частоты вращения свободной турбины ( $n_3$ ), не допуская при этом выхода параметров давления в камере сгорания ( $p_2$ ) и температуры газов ( $t_4$ ) за допустимые значения, которые также являются функциями температуры ( $t_1$ ) и давления воздуха ( $p_1$ ).
- в зависимости от фактических значений частот вращения роторов двигателя ( $n_1, n_2$ ) и давления в камере сгорания ( $p_2$ ) регулировать с помощью управляющих сигналов ( $z_2, z_3$ ), положение направляющих аппаратов ( $q_2, q_3$ ), при котором обеспечивается требуемый запас газодинамической устойчивости двигателя.

Работу системы управления можно описать тремя функциями:  $f_1$  – управления расходом топлива,  $f_2$  – управления положением НА КНД и  $f_3$  – управления положением НА КВД:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= f_1(ns, n_1, n_2, n_3, t_1, p_1, p_2, t_4, q_1), \\
 z_2 &= f_2(n_1, p_2, q_2), \\
 z_3 &= f_3(n_2, p_2, q_3).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Анализ приведенной на рис. 1 структурной схемы РСУ ГТП свидетельствует о том, что значения аргументов функций  $f_1, f_2$  и  $f_3$  могут быть получены из различных источников (резервированные датчики, модель, информационные связи с системой верхнего уровня); вычисления значений функций могут производиться на одном или нескольких процессорах различных контроллеров, внутрисистемный информационный обмен может осуществляться по одной из двух или одновременно по обоим шинам дублированного канала СВП, выдача сигналов управления как на дозатор топлива, так и на приводы направляющих аппаратов может производиться по любому из двух или одновременно по обоим каналам управления. В процессе функционирования РСУ ГТП могут возникать отказы отдельных компонент, могут происходить сбои в процессах измерений, вычислений, передачи данных. За счет аппаратной, вычислительной, информационной и временной избыточности РСУ ГТП может продолжать функционировать на оставшихся исправными компонентах.

Назовем конфигурацией совокупность компонент системы  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ , обеспечивающих выполнение определенной функции. Конфигурация может обеспечивать как выполнение функции управления объектом, т.е. заканчиваться расчетом выходного значения системы, так и выполнять промежуточные расчеты, определяющие значения параметров, необходимых для других конфигураций, например, рассчитывать наиболее достоверные значения входных параметров РСУ на основе показаний нескольких датчиков. Одна и та же функция в системе управления может реализовываться различными конфигурациями в зависимости от того, какие компоненты в данный момент времени являются исправными.

В распределенных системах управления сложными объектами могут присутствовать сотни компонент, которые в зависимости от их текущего состояния могут объединяться в десятки различных конфигураций для выполнения тех или иных функциональных задач. Формирование

таких конфигураций необходимо выполнять либо заранее на этапе проектирования системы, либо генерировать автоматически в реальном времени в зависимости от текущей сложившейся обстановки. Без использования формализованных методов проектирования и тот и другой подходы являются весьма трудоемкими, требуют большого «ручного» труда на этапах проектирования и тестирования системы, в связи с чем возникает необходимость разработки аналитических методов представления множеств конфигураций доступных ресурсов и управления этими конфигурациями в реальном времени.

Значение функции  $f_i$ , сформированное в некоторой  $j$ -й конфигурации  $C_j^i$ , будем обозначать как  $z_j^i$ . В рассматриваемой системе для функций  $f_1, f_2$  и  $f_3$  могут быть сформированы, например, по три различных варианта расчета выходных значений:

$$\begin{aligned}
 z^1_1 &= f_1(NS_3, N_{11}, N_{21}, N_{31}, T_{11}, P_{11}, P_{21}, T_{41}, Q_{11}), \\
 z^1_2 &= f_1(NS_3, N_{12}, N_{22}, N_{32}, T_{12}, P_{12}, P_{22}, T_{42}, Q_{12}), \\
 z^1_3 &= f_1(NS_3, N_{14}, N_{21}, N_{32}, T_{13}, P_{13}, P_{24}, T_{44}, Q_{11}), \\
 z^2_4 &= f_2(N_{11}, P_{21}, Q_{21}), \\
 z^2_5 &= f_2(N_{12}, P_{22}, Q_{22}), \\
 z^2_6 &= f_2(N_{14}, P_{24}, Q_{21}), \\
 z^3_7 &= f_3(N_{21}, P_{21}, Q_{31}), \\
 z^3_8 &= f_3(N_{24}, P_{22}, Q_{32}), \\
 z^3_9 &= f_3(N_{22}, P_{24}, Q_{31}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

В терминах функционального обозначения компонент данные варианты могут быть реализованы следующими конфигурациями:

$$\begin{aligned}
 C^1_1 &= \{NS_3, N_{11}, N_{21}, N_{31}, T_{11}, P_{11}, P_{21}, T_{41}, Q_{11}, U_1, U_2, L_1, L_{11}, L_{12}, L_3, Z_{11}\}, \\
 C^1_2 &= \{NS_3, N_{12}, N_{22}, N_{32}, T_{12}, P_{12}, P_{22}, T_{42}, Q_{12}, U_3, U_4, L_2, L_{23}, L_{24}, L_3, Z_{12}\}, \\
 C^1_3 &= \{NS_3, N_{14}, N_{22}, N_{32}, T_{13}, P_{13}, P_{24}, T_{44}, Q_{11}, U_1, U_2, U_5, L_1, L_{15}, L_{12}, L_2, L_{25}, L_{22}, L_3, Z_{11}\}, \\
 C^2_4 &= \{N_{11}, P_{21}, Q_{21}, U_1, U_2, L_1, L_{11}, L_{12}, Z_{21}\}, \\
 C^2_5 &= \{N_{12}, P_{22}, Q_{22}, U_3, U_4, L_{13}, L_{14}, L_2, L_{23}, L_{24}, Z_{22}\}, \\
 C^2_6 &= \{N_{14}, P_{24}, Q_{21}, U_2, U_5, L_1, L_{15}, L_{12}, L_{25}, L_{22}, Z_{21}\}, \\
 C^3_7 &= \{N_{21}, P_{21}, Q_{31}, U_1, U_2, L_1, L_{11}, L_{12}, Z_{31}\}, \\
 C^3_8 &= \{N_{24}, P_{22}, Q_{32}, U_3, U_4, U_5, L_2, L_{23}, L_{24}, Z_{32}\}, \\
 C^3_9 &= \{N_{22}, P_{24}, Q_{31}, U_2, U_3, U_5, L_1, L_{12}, L_{13}, L_{15}, L_2, L_{25}, L_{22}, Z_{31}\}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Те же конфигурации в терминах номеров компонент записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 C^1_1 &= \{C_{45}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{25}, C_{24}, C_{26}, C_1, C_2, C_6, C_7, C_8, C_{18}, C_{31}\}, \\
 C^1_2 &= \{C_{45}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{38}, C_{37}, C_{39}, C_3, C_4, C_{12}, C_{15}, C_{16}, C_{18}, C_{42}\}, \\
 C^1_3 &= \{C_{45}, C_{46}, C_{33}, C_{34}, C_{26}, C_1, C_2, C_5, C_7, C_{11}, C_8, C_{12}, C_{17}, C_{14}, C_{18}, C_{31}\}, \\
 C^2_4 &= \{C_{19}, C_{25}, C_{27}, C_1, C_2, C_6, C_7, C_8, C_{30}\}, \\
 C^2_5 &= \{C_{32}, C_{38}, C_{40}, C_3, C_4, C_9, C_{10}, C_{12}, C_{15}, C_{16}, C_{43}\}, \\
 C^2_6 &= \{C_{46}, C_{27}, C_2, C_5, C_6, C_{11}, C_8, C_{17}, C_{14}, C_{30}\}, \\
 C^3_7 &= \{C_{20}, C_{25}, C_{28}, C_1, C_2, C_6, C_7, C_8, C_{31}\}, \\
 C^3_8 &= \{C_{46}, C_{38}, C_{41}, C_3, C_4, C_5, C_{12}, C_{15}, C_{16}, C_{44}\}, \\
 C^3_9 &= \{C_{33}, C_{46}, C_{28}, C_2, C_3, C_5, C_6, C_8, C_9, C_{11}, C_{12}, C_{17}, C_{14}, C_{31}\}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Выражения (4) для множеств компонент  $c_k$ , присутствующих в конфигурациях  $C_j^i$  могут быть записаны в виде матрицы  $K$  размерности  $(n \times m)$ , где  $n$  – количество всех рассматриваемых в системе конфигураций,  $m$  – количество всех компонент системы, участвующих в формировании конфигураций. Элемент  $k_{ij}$  матрицы  $K$  равен 1, если в  $i$ -й конфигурации используется компонент РСУ  $c_j$  (см. рис. 1).

Определим вектор  $x$ , характеризующий текущее состояние всех компонент РСУ. Если все компоненты РСУ исправны, компоненты вектора  $x$  представляются в виде:

$$x_s = 1, s = 1 \dots m.
 \tag{5}$$

Для рассматриваемого примера  $m = 46$ . При наличии в системе неисправных компонент соответствующие им компоненты вектора  $\mathbf{x}$  равны нулю. Значение данного вектора формируется в реальном времени по результатам функционирования программных и технических средств самоконтроля РСУ.

Далее определим вектор готовности конфигураций  $\mathbf{y}$ , характеризующий готовность к работе всех рассматриваемых конфигураций.  $y_i = 1$ , если  $i$ -я конфигурация работоспособна, в противном случае  $y_i = 0$ ,  $i = 1 \dots n$ . Готовность конфигураций является функцией от задействованных в конфигурациях компонентов и их исправности.

$$(6) \quad \mathbf{y} = F_1(\mathbf{K}, \mathbf{x}),$$

где функция  $F_1$  определяется выражением:

$$(7) \quad F_1 = \bigcap_{s=1}^m (k_{j,s} \supset x_s)$$

символом  $\bigcap$  обозначена функция логического «И», символом  $\supset$  обозначена функция импликации, описываемая таблицей истинности, приведенной в Таблице 1.

Таблица 1. Функция импликации

$k_{j,s}$	1	0	1	0
$x_s$	1	1	0	0
$k_{j,s} \supset x_s$	1	1	0	1

Смысл выражения (7) состоит в том, что каждый  $j$ -й элемент вектора  $\mathbf{y}$  будет равен 1, т.е.  $j$ -я конфигурация будет работоспособна, если в данной конфигурации будут использованы только исправные компоненты.

В РСУ на основе СВП несколько или все конфигурации могут исполняться параллельно или последовательно, что позволяет парировать свои ее компонент. Количество исполняемых конфигураций ограничивается вычислительной мощностью РСУ. Если при исполнении нескольких конфигураций получены различающиеся между собой значения одного и того же выходного параметра, требуется решить две задачи: 1) отбраковать некорректные результаты и отметить сформировавшие их конфигурации как неработоспособные; 2) на основе результатов, полученных от признанных работоспособными конфигураций сформировать окончательное согласованное выходное значение.

Эффективным способом диагностики исправности компонентов РСУ является включение в ее состав встроенной модели объекта управления, работающей в реальном времени [4]. Это позволяет получить целый ряд дополнительных возможностей по повышению качества и надежности управления, улучшению эксплуатационных характеристик системы:

- фильтрация шумов и сбоев;
- восстановление неизмеряемых параметров для целей диагностики и управления;
- обнаружение нештатных состояний объекта и системы управления;
- диагностика состояния и параметрической деградации объекта.

Некоторые способы отбраковки некорректных значений рассмотрены в работах [5, 6]. Далее рассмотрим анализ работы конфигураций на основе допускового контроля.

Запишем полученный по результатам работы всех  $n$  конфигураций вектор выходных значений

$$(8) \quad \mathbf{z} = [z_1, \dots, z_j, \dots, z_n]^T$$

(верхние индексы для наглядности опущены) и исходный вектор готовности конфигураций

$$(9) \quad \mathbf{y} = [y_1, \dots, y_j, \dots, y_n]^T.$$

Посредством векторов  $z^{\min}$  и  $z^{\max}$  зададим соответственно минимально и максимально допустимые выходные значения для каждой из конфигураций.

Определим функцию допускового контроля как

$$(10) \quad F_2(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{z}^{\min}, \mathbf{z}^{\max}) = 1, \text{ если } (y_j=1) \& (z^{\min}_j \leq z_j \leq z^{\max}_j);$$

иначе 0.

Оценка вектора готовности конфигураций  $\hat{\mathbf{y}}$  определяется функцией  $F_2$ :

$$(11) \quad \hat{y} = F_2(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{z}^{\min}, \mathbf{z}^{\max}),$$

Нулевое значение какой-либо компоненты вектора готовности конфигураций свидетельствует о том, что в соответствующей конфигурации имеется один или несколько отказавших компонентов РСУ.

Далее определим функцию  $F_3$  как

$$(12) \quad F_3 = \bigcup_{j=1}^n (k_{j,s} \supset \hat{y}_j),$$

где символом  $\bigcup$  обозначена функция логического ИЛИ; символом  $\supset$  обозначена функция импликации. Для вектора  $\hat{x}$ , характеризующего оценку исправности компонентов РСУ, можно записать:

$$(13) \quad \hat{x} = F_3(K, \hat{y}).$$

Смысл выражения (13) состоит в том, что для каждого  $s$ -го элемента вектора состояния проверяется работоспособность всех  $j=1..n$  конфигураций, в которых он задействован. Если работоспособной признана хотя бы одна конфигурация, в которой задействован данный компонент, т.е. условие  $c_{j,s} \leq \hat{y}_j$  выполняется хотя бы для одного  $j=1..n$ , то  $s$ -й компонент идентифицируется как исправный. Если все конфигурации, в которых данный компонент задействован, признаны неработоспособными, то компонент идентифицируется как отказавший.

Алгоритм управления конфигурациями представлен на рис. 2. Алгоритм выполняется циклически. На первом шаге алгоритма осуществляется формирование исходного вектора  $\mathbf{x}$  исправности компонентов РСУ. При этом используются сформированный встроенными средствами самоконтроля компонентов РСУ вектор  $\mathbf{v}$  размерности  $m$  и вычисленный на предшествующем цикле вектор оценок исправности компонентов  $\hat{x}$ . На начальном цикле все компоненты вектора  $\hat{x}$  принимаются равными 1. На втором шаге на основе исходного вектора исправности  $\mathbf{x}$  и матрицы конфигураций  $K$  формируется вектор готовности конфигураций  $\mathbf{y}$ . Далее в соответствии с используемым методом проверки работоспособности конфигураций (в рассматриваемом примере – допусковый контроль) формируется вектор оценок готовности конфигураций  $\hat{y}$ . На четвертом шаге вычисляется вектор оценок исправности компонентов РСУ  $\hat{x}$ . В случае обнаружения неисправных конфигураций выполняется формирование новой матрицы конфигураций  $K$  путем замены используемых неисправных конфигураций на новые или замены в действующих конфигурациях РСУ неисправных компонентов на исправные.

Следует отметить, что как набор конфигураций, так и их компонентный состав могут быть оптимизированы по различным критериям, таким, как загрузка вычислительных и коммуникационных ресурсов РСУ, однозначность трактовки получаемых результатов. В частности, очевидно, что если каждый из компонентов системы будет задействован только в одной конкретной конфигурации и отсутствовать во всех остальных, то его неисправность однозначно выявляется при признании данной конфигурации отказавшей. Если два или более компонента присутствуют только в одной конфигурации (или группе конфигураций) и при этом отсутствуют во всех остальных, то различить их отказы по факту неработоспособности данной конфигурации не представляется возможным. Оптимизация количества и компонентного состава конфигураций РСУ должна выполняться с учетом глубины и достоверности встроенных программных и технических средств самодиагностики компонентов РСУ.

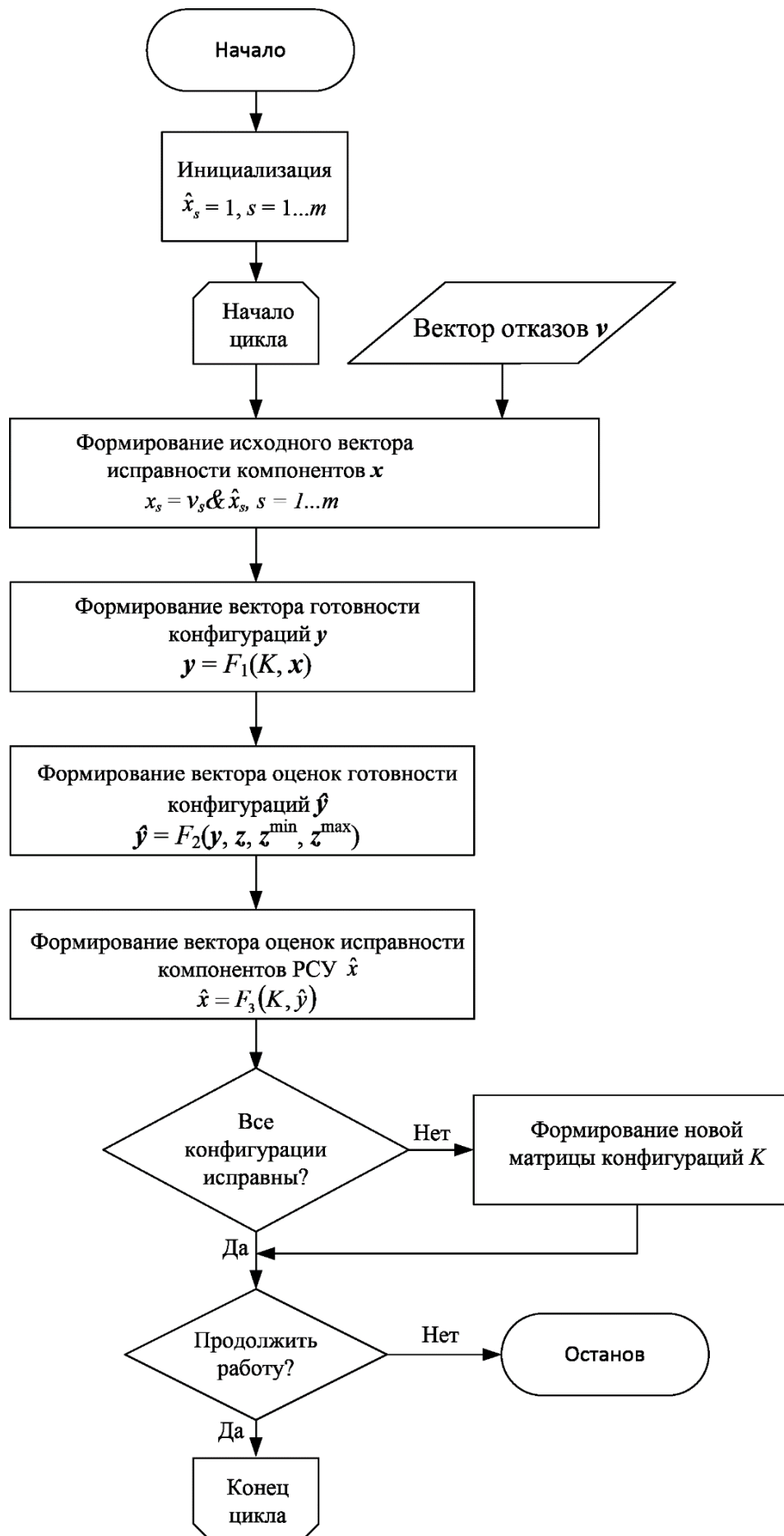


Рис. 2. Блок-схема алгоритма



## Литература

1. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // *Авиакосмическое приборостроение*, 2018 № 3. – С. 3-12.
2. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Синхронно-временной протокол для распределенных систем управления // *Автоматизация в промышленности* – 2013. - № 2. – С. 37-39.
3. Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2017. № 3. – С. 72-82.
4. Захаров Н.А., Калинин С.В., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивости распределенных систем управления // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. 2008. - № 7. – С.43-48.
5. Klepikov, V.I., Podkhvatilin, D.S., Dudorov, Y.N. Sharapov G.V., Zakharov N.A. Information-measuring diagnostics complex for technical maintenance Autom Remote Control (2011) 72: 1089. <https://doi.org/10.1134/S0005117911050171>
6. Клепиков В.И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. «Золотое сечение», 2014. - 392 с.