

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ ИХ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ.

Ч. 2. Классические модели

В. Н. Буков*, А. М. Бронников**, А. С. Попов***, В. А. Шурман****

*АО «Бортовые аэронавигационные системы», Москва,

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,

***ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж,

****АО «НИИ авиационного оборудования» г. Жуковский Московская обл.

*✉ v_bukov@mail.ru, **✉ bronnikov_a_m@mail.ru, ***✉ saga30@yandex.ru, ****✉ shurman@niiao.ru

Аннотация. Управление избыточностью технической системы предполагает использование процедуры мониторинга – контроля текущего состояния ее составных частей с целью реконфигурирования системы по мере необходимости. В обзоре, состоящем из четырех частей, приводятся современные и вновь развиваемые методы мониторинга в интересах управления избыточностью. Первая часть обзора посвящена общему описанию встроенных средств контроля, схемам голосования и правилам достоверности. Кратко освещены контрольные коды и методы контроля выполнения программ. Во второй части обзора рассматриваются методы диагностирования, основанные на классическом моделировании диагностируемой системы в дискретно-временной и частотной формах. Приводится схема обнаружения отказов Чоу – Вилски, а также определение и процедуры генерирования невязки в задаче диагностирования. Излагаются основные модельные методы диагностирования, использующие ошибки в уравнениях, наблюдатели, согласованность уравнений и избыточные переменные. В завершение кратко освещается проблема робастности методов диагностирования соответствующего типа.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, управление избыточностью, диагностирование, невязка, аналитические модели систем, метод ошибок в уравнениях, наблюдатели, фильтр Бирда, обнаружение отказов по согласованности уравнений, метод избыточных переменных, робастность методов.

ВВЕДЕНИЕ

Модельные (базирующиеся на математических моделях) методы диагностирования¹ основаны на выявлении несоответствия между реальными измерениями входных и выходных сигналов системы и сигналами ее математической модели, выражаемого так называемой невязкой (*residual*). Данные

¹ В данном контексте подразумевается исключительно аналитическое моделирование в «классическом» варианте, при котором центральным звеном является воспроизведение (с той или иной детальностью) законов функционирования диагностируемой системы; подходы с другими типами моделей вынесены в третью и четвертую части обзора.

методы начали активно развиваться с 1970-х гг. В частности, применялись схемы статического или параллельного резервирования [1, 2], которые могут быть получены непосредственно из измерений (аппаратное резервирование) или из аналитических соотношений (аналитическое резервирование). Обзоры этих методов можно найти в работах [3–5].

В этой части обзора освещены методы, наиболее часто применяемые в системах диагностики сложных технических комплексов различного назначения. Их неоспоримым достоинством является прежде всего инженерная прозрачность, т. е. интуитивная ясность протекающих процессов и

причинно-следственных связей для специалистов соответствующей технической области. Эффективность рассмотренных методов зависит от конкретных условий применения, и их выбор определяется функциональным назначением устройства, его структурной организацией и технологическими особенностями изготовления и функционирования, а также требуемыми показателями надежности и достоверности.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема Чоу – Вилски [4], обобщающая большинство методов обнаружения отказного функционирования системы, включающей актуаторы, объект и датчики, показана на рис. 1.

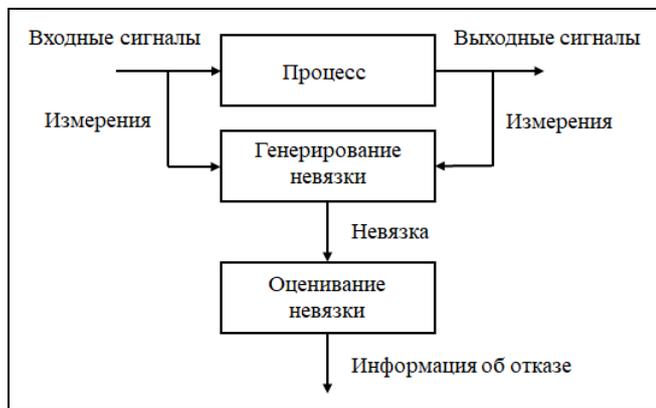


Рис. 1. Схема Чоу – Вилски

Схема обнаружения отказа в реальном времени включает два основных блока:

- Генерирование невязки: путем использования входных и выходных сигналов контролируемого процесса формируется сигнал, называемый невязкой. Эта невязка не должна зависеть от входных и выходных сигналов и при отсутствии отказов должна принимать значение, равное или близкое к нулю.
- Оценивание невязки: проводится анализ значения невязки, на основе которого принимается решение о наличии или отсутствии отказа. Правила принятия решения могут использовать как простой допусковый контроль, так и сложные формы преобразования сигналов, включая методы статистического анализа.

При этом основное внимание исследователей сосредоточено на генерировании невязки, поскольку процедуры ее оценивания в значительной степени универсальны.

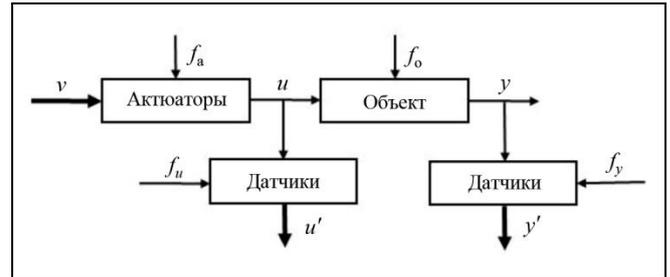


Рис. 2. Топология отказов динамической системы

Топологию отказов, влияющих на работу системы, поясняет рис. 2, где v – внешнее входное воздействие; u – управление, подаваемое на объект; y – выходной сигнал объекта; u' и y' – измеренные (доступные для обработки) сигналы; f_a , f_o , f_u и f_y – формализованное представление отказов, возникающих в актуаторах, объекте и в датчиках входного и выходного сигналов объекта. С той или иной точностью известны только сигналы v , u' и y' .

Хотя большинство систем, подлежащих мониторингу, на самом деле являются нелинейными, методы моделирования и идентификации линейных систем часто используются для того, чтобы избежать сложностей, которые характерны для использования нелинейных моделей. В большинстве случаев это не является существенным ограничением, поскольку мониторинг динамической системы осуществляется в окрестности ожидаемого режима функционирования, а отклонения от него хорошо описываются линейными моделями.

1.1. Описание аналитических моделей

В соответствии с гипотезой линейности динамического процесса его поведение в дискретном времени $t=0, 1, 2, \dots$ в терминах пространства состояний описывается моделью [6–10]

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t, \quad y_t = Cx_t, \quad (1)$$

где $x_t \in \mathcal{R}^n$ – вектор состояния системы; $u_t \in \mathcal{R}^r$ – вектор истинных входных сигналов; $y_t \in \mathcal{R}^m$ – вектор истинных выходных сигналов; A , B и C – числовые матрицы коэффициентов системы.

Влияние отказов на объект описывается моделью (вектор отказов f_o представлен двумя векторами $f_{ab,t}$ и $f_{c,t}$, связанными с номером такта t)

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + f_{ab,t}, \quad y_t = Cx_t + f_{c,t}, \quad (2)$$



где $f_{ab,t} = \Delta A x_t + \Delta B u_t$, $f_{c,t} = \Delta C x_t$; ΔA , ΔB , ΔC – изменения матриц коэффициентов вследствие возникших отказов. Иногда отказы трактуют иначе: $f_{ab,t} = A \Delta x_t + B \Delta u_t$, $f_{c,t} = \Delta y_t$, где Δx_t – постороннее воздействие на внутренние переменные; Δu_t – ошибки (отказы) актюаторов; Δy_t – ошибки (отказы) датчиков.

Поскольку описания пространства состояний обеспечивают общие и математически строгие инструменты для моделирования системы и робастной генерации невязок как для детерминированного случая (измерения без помех), так и для стохастического (измерения, подверженные шуму), матрицы системы A , B и C в канонической форме для моделей (1) и (2) могут быть получены с помощью процедур многомерной идентификации.

Измерения входных и выходных сигналов подвергаются влиянию отказов согласно формулам

$$u'_t = u_t + f_{u,t}, \quad y'_t = y_t + f_{y,t},$$

где u'_t и y'_t – измеренные значения входных и выходных сигналов.

Обычно для моделирования внезапных и развивающихся отказов используются ступенчатые и темповые (градиентные) сигналы, представляющие собой смещение (одноразовое изменение на одном такте) и дрейф (монотонные изменения на последовательности тактов) соответственно.

Помехи измерений, влияющие на выходные сигналы датчиков, обычно описываются некоррелированными гауссовскими процессами.

Рассматриваемая общая задача диагностирования отказов (англ. *Fault Detection*, FD) на основе модели может быть решена только при знании измеренных последовательностей u'_t и y'_t . Кроме того, широко используются априорные знания о характеристиках получаемых сигналов u'_t и y'_t . В качестве примера можно привести спектр, динамический диапазон сигнала и его вариации. Однако необходимость априорной информации о контролируемых сигналах и зависимость характеристик сигнала от неизвестных условий работы диагностируемой системы являются основными недостатками методов такого класса.

Наряду с моделями (1) и (2) для описания функционирования диагностируемой системы в частотной области могут использоваться модели вида

$$y_t = W_y^u(z)u_t + \Delta W_y^u(z)u_t, \quad (3)$$

где z – оператор сдвига на один такт вперед²; $W_y^u(z)$ – передаточная (рациональная полиномиальная) матрица от входного воздействия u_t к выходу y_t системы; $\Delta W_y^u(z)$ – изменение передаточной матрицы $W_y^u(z)$, вызванное отказами.

Обычно модель (3) применяется в тех случаях, когда для воздействующих отказов, а также возмущений известны частотные характеристики, что позволяет использовать информацию в частотных спектрах в качестве критериев для обнаружения отказов.

1.2. Формирование невязок

Общая структура генератора невязки [11, 12] показана на рис. 3. Здесь z_t – вспомогательный сигнал, который, как правило, содержательно значим для разработчика (например, вектор состояний системы или ее частей), r_t – сигнал невязки, $W_1(u_t, y_t)$ и $W_2(z_t, y_t)$ – основные блоки генератора.

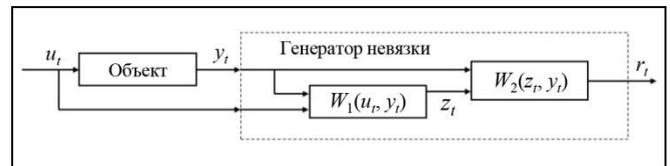


Рис. 3. Общая структура генератора невязки

Независимо от того, какой метод применяется, процесс генерирования невязки представляет собой не что иное, как линейное отображение, входы которого состоят из входов и выходов контролируемого процесса. В безотказном состоянии выполняется условие $r_t = 0$.

Простейший генератор невязки получается, когда передаточная матрица W_1 идентична модели (3) объекта: $W_1(u_t, y_t) = W_y^u(z)$, т. е. это описание реального процесса, полученное в результате процедуры идентификации системы (например, авторегрессионная экзогенная модель [13]).

Наиболее простой и широко используемый способ обнаружения отказов заключается в непосредственном сравнении невязки r_t или ее некото-

² Такое толкование предполагает игнорирование начальных условий модели. При альтернативном толковании оператора как z -преобразования учитываются начальные условия.

рой функции $J(r_t)$ с фиксированным порогом ε или пороговой функцией ε_t следующим образом:

$$J(r_t) = \begin{cases} \leq \varepsilon_t & \text{при } f_t = 0, \\ > \varepsilon_t & \text{при } f_t \neq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где f_t – обобщенный вектор отказов. Таким образом, если невязка превышает установленное пороговое значение, то объявляется о наличии отказа.

Такой тест особенно результативен с фиксированными порогами ε , если объект работает преимущественно в устойчивом состоянии. Он реагирует либо после большого внезапного, либо после длительно постепенно нарастающего отказа.

В большинстве практических случаев параметры процесса неизвестны вообще или известны недостаточно точно. Тогда их можно определить с помощью методов оценки параметров, измеряя входные и выходные сигналы u_t и y_t , если известна основная структура модели.

2. МЕТОД ОШИБОК В УРАВНЕНИЯХ

Дискретно-временная модель SISO-объекта (англ. *Single Input Single Output* – один вход, один выход) порядка n записывается в векторной форме

$$y_t = \Psi^T \Theta,$$

где $\Theta = [a_1 \ \dots \ a_n \ b_1 \ \dots \ b_n]^T$ – вектор параметров объекта; $\Psi = [y_{t-1} \ \dots \ u_{t-n}]^T$ – вектор дискретно-временных данных на n последовательных тактах измерений.

Вводится сигнал рассогласования

$$e_t = y_t - \Psi^T \hat{\Theta},$$

где $\hat{\Theta}$ – оценка параметров. По методу наименьших квадратов, связанному с выполнением ра-

$$J(\hat{\Theta}) = \sum_t e_t^2 = e^T e, \quad \frac{dJ(\hat{\Theta})}{d\hat{\Theta}} = 0,$$

оценка параметров определяется формулой

$$\hat{\Theta}_t = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T y_t. \quad (5)$$

Как описано в работах [14–16], оценка (5) может быть также вычислена с помощью рекуррентного³ алгоритма наименьших квадратов в режиме

³ В программировании используется эквивалентный термин «рекурсивный».

реального времени $t = 0, 1, 2, \dots$ относительно оценок в момент t :

$$\hat{\Theta}_{t+1} = \hat{\Theta}_t + \gamma_t (y_{t+1} - \Psi_{t+1}^T \hat{\Theta}_t),$$

где

$$\gamma_t = (\Psi_{t+1}^T P_t \Psi_{t+1} + 1)^{-1} P_t \Psi_{t+1}, \quad P_{t+1} = (I_{2n} - \gamma_t \Psi_{t+1}^T) P_t,$$

I_{2n} – единичная матрица размера $2n \times 2n$. В качестве начальных условий P_0 для матрицы P_t принимается либо единичная матрица, либо предполагаемая ковариационная матрица начальных ошибок оценки $\hat{\Theta}_0$.

Для улучшения сходимости можно применять методы фильтрации. В частности, когда на измерения влияют помехи, для оценки параметров может быть использован фильтр Калмана [17, 18].

Собственно диагностирование осуществляется по различию вектора полученных оценок $\hat{\Theta}_t$ параметров и его «опорных» значений, соответствующих либо отсутствию, либо наличию определенных отказов в системе. Для этого могут привлекаться подходы, описанные в § 5 первой части [19] и в третьей части данного обзора.

3. ПОДХОДЫ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Основная идея методов на основе наблюдателей или фильтров заключается в оценке выходов системы по результатам измерений с помощью наблюдателей Люенбергера в детерминированном случае или фильтров Калмана в случае наличия случайных помех. При этом ошибка оценки выхода (или ее взвешенное значение) используется в качестве невязки.

Следует отметить, что при использовании наблюдателя для целей диагностирования необходимо оценивать выходы, а оценка вектора состояния обычно не требуется [20]. Кроме того, преимуществом использования наблюдателя является гибкость в выборе его коэффициентов усиления, что приводит к богатому разнообразию схем диагностирования [21–30].

В линейной динамической модели (1) при точно известных матрицах A , B и C для восстановления переменных используется наблюдатель

$$\hat{x}_{t+1} = A\hat{x}_t + Bu_t + He_t, \quad e_t = y_t - C\hat{x}_t, \quad (6)$$

где $\hat{x}_t \in \mathcal{R}^n$ – оценка вектора состояния; $e_t \in \mathcal{R}^m$ – ошибка выхода. В то же время ошибка состояния $e_t^x \in \mathcal{R}^n$ удовлетворяет уравнениям

$$e_t^x = x_t - \hat{x}_t, \quad e_{t+1}^x = (A - HC)e_t^x$$



и исчезает асимптотически, если матрица $A - HC$ устойчива.

В случае наличия возмущений и отказов справедливы уравнения

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + Qv_t + L_1f_t, \quad y_t = Cx_t + Rv_t + L_2f_t,$$

где v_t – неизмеряемый вектор возмущений на входе; w_t – неизмеряемый вектор возмущений на выходе; f_t – приведенный вектор отказов, аддитивно влияющих на функционирование объекта; Q и R – матрицы влияния возмущений; L_1 и L_2 – матрицы влияния отказов.

Тогда для оценки состояния при условиях $v_t = 0$ и $w_t = 0$ справедливы уравнения

$$e_{t+1}^x = (A - HC)e_t^x + L_1f_t - HL_2f_t, \\ e_t = Ce_t^x + L_2f_t,$$

которые описывают влияние обобщенных отказов f_t на ошибки e_t^x и e_t , используемые в качестве невязок. Выбор матрицы H влияет на свойства невязок. При этом ограничивающими условиями выбора H являются устойчивость и чувствительность к возмущениям v_t и w_t . Если на сигналы влияют помехи, то вместо классических наблюдений необходимо использовать фильтр Калмана [17].

Если отказы проявляются в виде изменений ΔA или ΔB параметров, то поведение процесса приобретает вид

$$x_{t+1} = (A + \Delta A)x_t + (B + \Delta B)u_t, \quad y_t = Cx_t,$$

в то время как ошибки оценок представлены в виде

$$e_{t+1}^x = (A - HC)e_t^x + \Delta Ax_t + \Delta Bu_t, \quad e_t = Ce_t^x.$$

В этом случае изменения ΔA и ΔB являются мультипликативными ошибками, и изменения ошибок зависят как от изменений параметров, так и от изменений входных переменных и переменных состояния. Следовательно, влияние изменений параметров на ошибки не так однозначно, как в случае аддитивных дефектов f_t . Конкретные варианты решения можно найти в работах [14, 25].

Для МИМО-процессов (англ. *Multiple Input Multiple Output* – много входов, много выходов) применяется следующая декомпозиция: выделяется либо один наблюдатель, возбуждаемый одним выходом [26], либо банк наблюдателей, возбуждаемых всеми выходами с проверкой гипотез [27], либо банк наблюдателей, возбуждаемых отдельными выходами [26], либо всеми выходами, кроме

одного [28, 29]. Это позволяет обнаружить отказы различных комбинаций датчиков.

В случае МИМО обратная связь H наблюдателя состояния в уравнении (6) выбирается таким образом, чтобы конкретные сигналы отказов L_1f_t изменялись в определенном направлении, а сигналы отказов L_2f_t – в определенной плоскости [29, 31].

При наличии направленных векторов невязок задача выделения отказа сводится к определению того, к какому из известных направлений сигнатуры отказов ближе всего лежит вектор невязки. Первоначальная форма «фильтра обнаружения отказов» была предложена Р. Бирдом [31] и Х. Джонсом [32] для генерации направленных векторов невязок.

В дальнейшем было предложено множество более простых методов, включая методы получения «робастного фильтра обнаружения отказов» [33]. Такой фильтр представляет собой класс наблюдателей Люенбергера со специально разработанной матрицей усиления обратной связи. Другой возможностью является использование выходных наблюдателей или так называемых обобщенных наблюдателей, например, наблюдателей с неизвестным входом с реконструкцией выходных сигналов, если оценка переменной состояния \hat{x}_t не представляет основного интереса.

4. ФИЛЬТР БИРДА

Возможности и ограничения подходов, использующих направления сигнатуры отказа, проиллюстрируем фильтром Бирда [31].

Рассматривается линейная динамическая система с дискретным временем $t = 1, 2, \dots$, поведение которой описывается уравнением

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + B[0 \ \dots \ f_i \ \dots \ 0]^T, \quad (7) \\ x_{t=0} = x_0,$$

где $x_t \in \mathcal{R}^n$ – вектор состояния; $u_t \in \mathcal{R}^l$ – вектор управления; $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $B \in \mathcal{R}^{n \times l}$ – матрицы постоянных коэффициентов; дополнительное слагаемое $B[0 \ \dots \ f_i \ \dots \ 0]^T$ соответствует неизвестному воздействию f_i на i -м входе системы, $i = \overline{1, l}$, $l \leq n$. Предполагается, что все рассматриваемые отказы системы сводятся к совокупности неизвестных воздействий на входах.

Использование фильтра Бирда позволяет как обнаружить наличие m отказов указанного типа, так и указать конкретный столбец b_i матрицы B , которому соответствует постороннее воздействие.

Фильтр предполагает введение вспомогательной динамической системы

$$w_{t+1} = Aw_t + Bu_t + K(x_t - w_t), \quad w_{t=0} = w_0, \quad (8)$$

которая повторяет структуру контролируемой системы (7) с добавлением слагаемого $K(x_t - w_t)$. Матрица коэффициентов K здесь выбирается специальным образом.

Вычитая уравнение (8) из уравнения (7), получаем

$$x_{t+1} - w_{t+1} = A(x_t - w_t) - K(x_t - w_t) + B(u_t - u_t) + B \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вводя обозначение невязки $r_t = x_t - w_t$, запишем уравнение (9) в виде

$$r_{t+1} = (A - K)r_t + B \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Заметим, что невязка не зависит от входного сигнала u_t и состояния системы x_t , а определяется лишь наличием постороннего сигнала f_i и свойствами матрицы $(A - K)$.

Пусть матрица коэффициентов K выбрана таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$A - K = \alpha I_n, \quad (11)$$

где I_n – единичная матрица размера $n \times n$; α – действительное число с нормой $|\alpha| < 1$. Тогда формула (10) принимает вид

$$r_{t+1} = \alpha r_t + B \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad r_{t=0} = r_0, \quad (12)$$

и фильтр является устойчивым. Это обстоятельство, а также диагональность матрицы (11) приводят к тому, что с течением времени невязка r_t приближается к значению вектора

$$r_{\text{lim}} = \frac{1}{1-\alpha} [b_{1i} \ \dots \ b_{ii} \ \dots \ b_{ni}]^T f_i.$$

Матрица B уравнения (7) содержит m столбцов, каждый из которых задает в n -мерном пространстве свое направление⁴. Вопрос, таким образом, сводится к определению тех столбцов матрицы B , на которые в векторном представлении проектируется вектор (12). Оцениваться могут одновременно все l воздействий (отказов) f_i .

Этим возможности фильтра Бирда не исчерпаны. Путем аналогичных выкладок можно получить соотношения для постолбцового определения изменения элементов матрицы A в уравнении (7). В этом случае следует рассмотреть уравнение

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + A[0 \ \dots \ \mu_i \ \dots \ 0]^T. \quad (13)$$

При выполнении соответствующих условий с течением времени невязка будет стремиться к значению

$$r_{\text{lim}} = \frac{1}{1-\alpha} [a_{1i} \ \dots \ a_{ii} \ \dots \ a_{ni}]^T \mu_i.$$

В дальнейшем все аналогично изложенному выше. Одновременно могут оцениваться все n воздействий (отказов) μ_i .

Основные свойства фильтра Бирда заключаются в следующем:

- обнаруживаются постоянные отказы указанного типа,
- для получения оценки отказа требуется время для завершения переходных процессов в фильтре,
- при доступности для измерения только части вектора состояния $y_t = Cx_t$, где $y_t \in \mathfrak{R}^m$, $C \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, возможно оценивание только m отказов, описываемых m столбцами по схемам (6) и (12) из множества всех столбцов матриц A и B .

Для дальнейшего изложения воспользуемся формулами, приведенными в § 5 первой части обзора [19].

Пусть синдром представляет собой m -мерный вектор $\Delta = [\Delta_1 \ \dots \ \Delta_m]^T$, а возможные отказы объекта формализуются n -мерным вектором $F = [f_1 \ \dots \ f_n]^T$. Тогда

$$\Delta = \Phi(Y, Z, F) = 0. \quad (14)$$

Для проявления реакции синдрома Δ на единичный отказ $f_i \neq 0$ достаточно выполнения условия ненулевой чувствительности

$$\exists j: \frac{\partial \Phi_j}{\partial f_i} \neq 0. \quad (15)$$

В случае же множественного отказа, когда одновременно присутствуют несколько отказов f_i , требуется выполнение дополнительного условия невозможности взаимной компенсации (14) эффектов этих отказов

$$\begin{bmatrix} \partial \Phi_1 / \partial f_1 & \dots & \partial \Phi_1 / \partial f_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial \Phi_m / \partial f_1 & \dots & \partial \Phi_m / \partial f_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \neq 0. \quad (16)$$

⁴ Предполагается, что столбцы линейно независимы.



Фильтр Бирда является частным случаем подхода с алгебраическими инвариантами, где избыточность создается искусственно введением дополнительной системы (8). Условие чувствительности (15) выполняется на каждом такте всегда, поскольку в качестве синдрома (14) выступает невязка r_{i+1} , а с учетом уравнения (12) $\partial r_{i+1} / \partial f_i = B$ и с учетом уравнения (13) $\partial r_{i+1} / \partial \mu_i = A$. Условие же (16) выливается в оговоренное выше свойство ограниченности числа обнаруживаемых отказов, поскольку оно предписывает линейную независимость столбцов $[\partial r_{1,i+1} / \partial f_k \ \dots \ \partial r_{m,i+1} / \partial f_k]^T$, обеспечивающую невырожденность соответствующей матрицы и, как необходимое условие, равенству числа невязок $r_{j,i+1}$ и обнаруживаемых отказов f_k .

5. ОБНАРУЖЕНИЕ ОТКАЗОВ ПО СОГЛАСОВАННОСТИ УРАВНЕНИЙ

Основная идея подхода на основе согласованности уравнений (англ. *fault detection via parity equations*) состоит в проверке соответствия различных (как правило, входных и выходных) измерений, получаемых на контролируемом объекте и схеме контроля [34].

Как и для наблюдателей, параметры модели и структура наблюдаемого процесса должны быть известны априори.

Принцип обнаружения отказа заключается в следующем. Для SISO-объекта с известной передаточной функцией $W(z) = b(z) / a(z)$ параллельно используется модель $W_m(z) = b_m(z) / a_m(z)$, где $a(z)$, $b(z)$, $a_m(z)$ и $b_m(z)$ – известные полиномы оператора z . По решению разработчика реализуется какая-либо из схем, приведенных на рис. 4.

Схема, приведенная на рис. 4, а, соответствует невязке выходов, на рис. 4, б – невязке входов, а на

рис. 4, в – промежуточному варианту. В этих схемах при совпадении динамических свойств (параметров полиномов) объекта и его модели сигнал невязки r_i равен нулю. Наличие же отказов, приводящих к изменению значений параметров передаточной функции объекта, порождает возникновение сигнала невязки, отличного от нуля.

Представленные схемы обладают различной чувствительностью к различным отказам. Кроме того, для достижения приемлемой чувствительности или грубости они могут быть дополнены различными фильтрами [34, 35]. Здесь по умолчанию измеренные сигналы равны их истинным значениям: $u'_i = u_i$ и $y'_i = y_i$.

В работе [36] показано, что схемы согласованности обеспечивают меньшую гибкость проектирования по сравнению с методами, основанными на использовании наблюдателей и не имеющими каких-либо ограничений.

Одним из недостатков данного метода является то, что для SISO-объекта формируется только один признак (невязка), что не позволяет уточнять характер и место отказа: есть одно уравнение, и ненулевое значение одной невязки свидетельствует только о рассогласовании этого уравнения. Ничего больше из этого извлечь невозможно. Для преодоления указанного недостатка предложены различные решения [33, 37].

6. МЕТОД ИЗБЫТОЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Данный метод предложен Л. А. Мироновским [38] и относится к наиболее результативным. Основой метода является введение динамической системы для переменных $z \in \mathfrak{R}^k$, дополняющей модель контролируемого объекта

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t, \tag{17}$$

где $x_t \in \mathfrak{R}^n$, $u_t \in \mathfrak{R}^l$, а A и B – постоянные матрицы.

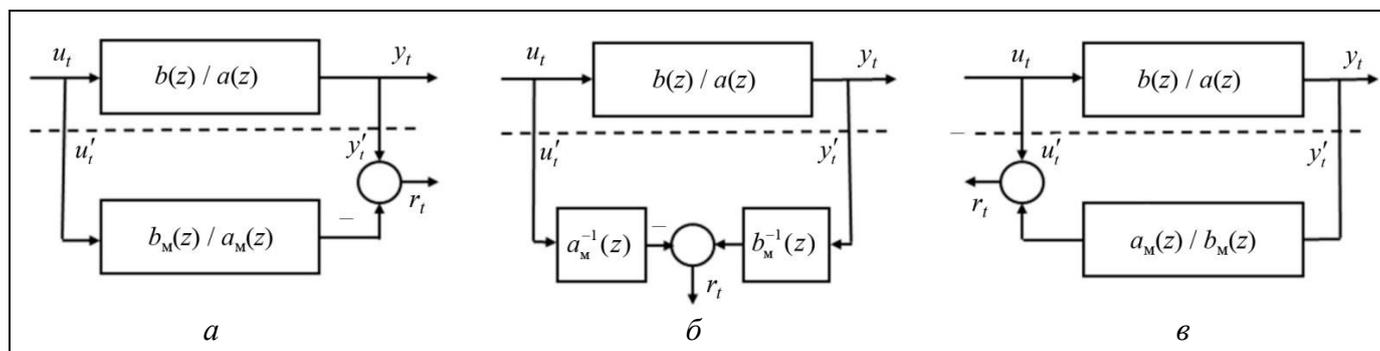


Рис. 4. Типовые схемы согласованности уравнений для обнаружения отказов: а – по выходам, б – по промежуточному сигналу, в – по входам

Избыточные переменные вводятся с удовлетворением двух условий

$$Mz_t = 0, \quad Tz_t = x_t, \quad (18)$$

где $M \in \mathcal{R}^{k \times (n+k)}$ и $T \in \mathcal{R}^{n \times (n+k)}$ – известные (заданные) постоянные матрицы⁵. Подставляя выражение (17) в условия (18) и разрешая относительно z_{t+1} , получаем уравнение $(n+k)$ -го порядка

$$z_{t+1} = \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} AT \\ 0 \end{bmatrix} Tz_t + \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_t,$$

описывающее поведение избыточной системы. Эта система, если устойчива, эквивалентна исходной системе (17) в смысле выхода x_t , но одновременно позволяет контролировать ее функционирование по k -мерному вектору невязки

$$r_t = Mz_t.$$

Известны различные уточнения формулировки и решения метода избыточных переменных [11, 39], распространяющие его на модели с передаточными функциями и нелинейные модели, а также позволяющие минимизировать избыточность системы.

Поскольку этот метод, как и фильтр Бирда, является частным случаем метода с алгебраическими инвариантами, то на него распространяются условия чувствительности (15) и (16).

Если возможные отказы объекта контроля формализуются уравнением

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + F,$$

где $F = [f_1 \ \dots \ f_n]^T$ – вектор неизмеряемых воздействий, представляющих неучтенные изменения (отказы) в объекте, то в соответствии с условиями (18) получаем на первом такте для каждого из формализованных отказов f_i :

$$\frac{\partial r_{t+1}}{\partial f_i} = \begin{bmatrix} \partial r_{1,t+1} / \partial f_i \\ \vdots \\ \partial r_{k,t+1} / \partial f_i \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_i \\ 0 \\ 0_{k \times 1} \end{bmatrix}_{(n+k) \times 1}, \quad (19)$$

где 1_i – единица, стоящая в i -й строке последнего сомножителя-столбца. А на каждом последующем такте $t+q$, $q = \overline{2, N}$, с учетом формулы (17) получаем

⁵ Подразумевается, что строки матриц M и T линейно независимы.

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_{t+q}}{\partial f_i} &= \begin{bmatrix} \partial r_{1,t+q} / \partial f_i \\ \vdots \\ \partial r_{k,t+q} / \partial f_i \end{bmatrix} = \\ &= \sum_{s=0}^{N-1} A^s M \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_i \\ 0 \\ 0_{k \times 1} \end{bmatrix}_{(n+k) \times 1}, \end{aligned} \quad (20)$$

где A^s – s -ая степень матрицы A из формулы (17).

При этом ненулевые значения компонент (19) и (20) при наличии отказов не являются очевидными и зависят от выбора матриц T и M , что требует от разработчика определенного искусства. Так, читатель может убедиться, что в простейшем случае диагональной или кодиагональной матрицы $\begin{bmatrix} T^T & M^T \end{bmatrix}^T$ чувствительность всех компонент невязки r_{t+1} к любому отказу f_i имеет нулевое значение.

7. РОБАСТНОСТЬ МОДЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Особого внимания заслуживает проблема робастности алгоритмов диагностирования к различным неопределенностям, включая ошибки моделирования и действующие шумы измерителей.

Как правило, в теоретических исследованиях и практических приложениях все неопределенности обобщаются в аддитивные возмущения, действующие на систему (объект, датчики, актуаторы). Хотя вектор возмущений неизвестен, полагается, что оценка его значения может быть получена с помощью процедур идентификации.

Целью подходов к устранению возмущений в системе диагностирования является полное исключение влияния возмущений на невязку, что в общем случае может оказаться невозможным. Существует компромисс между чувствительностью к ошибкам и устойчивостью к неопределенности моделирования, поэтому робастное формирование невязок можно рассматривать как многоцелевую оптимизационную задачу [4, 40]. Она состоит из максимизации влияния дефектов и минимизации влияния неопределенности.

Один из активных способов достижения робастности обнаружения отказов [1] основан на приближенном представлении в модели (1) ошибок моделирования:

$$\Delta W_y^u(z)u_t \approx W_y^d(z)d_t,$$



где d_i – неизвестный вектор, а $W_y^d(z)$ – оценочная передаточная функция. Если использовать эту приближенную структуру для проектирования генераторов невязок, отключающих помехи, то можно получить робастные алгоритмы обнаружения отказов.

Другой подход, называемый пассивной робастностью, предполагает использование генератора невязок с адаптивным порогом. В качестве простого примера можно привести метод робастного обнаружения отказов с пороговым адаптером или селектором [41]. Этот метод не предполагает никаких усилий для разработки робастной невязки.

В этом случае неопределенность генерации невязок представляется в виде

$$r_i = H(z)\Delta W_y^u(z)u_i.$$

В предположении малости ошибок моделирования

$$\|\Delta W_y^u(z)\| \leq \delta$$

адаптивный порог может быть сформирован линейной системой

$$\varepsilon_i = \delta H(z)u_i.$$

В этом случае порог ε_i уже не фиксирован, а зависит от входного сигнала u_i , являясь, таким образом, адаптивным к рабочему режиму системы. Сбой обнаруживается, если

$$\|r_i\| > \|\varepsilon_i\|.$$

Более детальный подход к робастной генерации невязки предполагает дискретное описание объекта в терминах передаточных матриц

$$y_i = (W_y^u(z) + \Delta W_y^u(z))u_i + W_y^d(z)d_i + W_y^f(z)f_i, \quad (21)$$

где u_i и y_i – вход и выход объекта; f_i – вектор отказов, подлежащих определению; d_i – вектор возмущений; $\Delta W_y^u(z)$ – ошибка представления передаточной матрицы $W_y^u(z)$; $W_y^d(z)$ – влияние возмущения моделирования; матрицы $\Delta W_y^u(z)$ и $W_y^d(z)$ вместе описывают неопределенности моделирования.

Генератор невязок r_i , приведенный на схеме рис. 4, а, описывается уравнением

$$r_i = H_y(z)(y_i - y_i^m), \quad (22)$$

где y_i^m – выход модели (1) без отказов, ошибок и возмущений; $H_y(z)$ – передаточная матрица обра-

ботки невязки. После подстановки выражения (21) в уравнение (22) получаем

$$r_i = H_y(z)W_y^f(z)f_i + H_y(z)W_y^d(z)d_i + H_y(z)\Delta W_y^u(z)u_i. \quad (23)$$

Выделение первого слагаемого в формуле (23) на фоне двух других слагаемых является весьма сложной задачей. Поэтому обычно робастная генерация невязки сводится к выполнению условия

$$H_y(z)W_y^d(z) = 0, \quad (24)$$

для чего применяются различные подходы (с наблюдателями, оптимизационные, с заданными структурами, схемы идентификации и пр.). Часто полное решение такой задачи недостижимо: утрачивается чувствительность к отказам. Однако известны компромиссные решения.

Развязка от возмущений может быть также достигнута с помощью методов проектирования в частотной области. В качестве примера можно привести решение задачи робастного обнаружения отказов с помощью стандартной формулировки фильтрации H_∞ .

Так, в случае невыполнения условия (24) можно получить приближенную оценку, например, в виде индекса эффективности [42]:

$$J_d = \frac{\|H_y(z)W_y^d(z)\|}{\|H_y(z)W_y^f(z)\|} \quad \text{или} \quad J = \left\| \frac{\partial r}{\partial \varepsilon} \right\| / \left\| \frac{\partial r}{\partial f} \right\|.$$

Более элегантные и продвинутое методы оптимизации H_∞ основаны на использовании алгебраического уравнения Риккати [43]. Часто для формирования невязки используется несколько модифицированный H_∞ -фильтр, т. е. целью проектирования является минимизация влияния возмущений и ошибок моделирования на ошибку оценивания и, как следствие, на невязку. Однако робастное формирование невязки отличается от робастного оценивания тем, что требуется не только ослабление возмущений. Невязка должна оставаться чувствительной к отказам при минимизации влияния возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из второй части обзора следует, что методы диагностирования на основе классического моделирования объекта контроля по-прежнему привлекают значительное количество исследователей. Активно используются методы диагностирования на основе идентификационного подхода, наблюдателей, согласованности уравнений. Широкою из-

вестность получил фильтр Бирда, являющийся частным случаем подхода с алгебраическими инвариантами, где избыточность создается искусственно введением дополнительной системы. Одним из результативных подходов к диагностике является метод избыточных переменных. Особого внимания заслуживает проблема робастности алгоритмов диагностирования к различным неопределенностям, включая ошибки моделирования и действующие шумы измерителей.

В третьей части обзора будут изложены методы диагностирования, основанные на нейронных сетях, нечетких и структурных моделях и моделях в виде множеств. Четвертая часть будет посвящена новым подходам к диагностированию и объединению различных моделей и методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Potter, I.E., Suman, M.C.* Thresholdless Redundancy Management with Array of Skewed Instruments: Technical Report // AGARDOGRAPH. Integrity in Electronic Flight Control Systems. – 1977. – No. 224. – P. 1511–1525.
2. Авторское свидетельство SU 475604 A1. Устройство для определения границы области работоспособности непрерывной n -мерной технической системы : заявл. 01.02.1973 : опубл. 30.06.1975, бюл. № 24 / Иванов Н.В., Краснов И.А., Мозгалецкий А.В., Юдин Ю.В. [Avtorskoe svidetel'stvo SU 475604 A1. Ustrojstvo dlya opredeleniya granicy oblasti rabotosposobnosti nepreryvnoj n -mernoj tekhnicheskoy sistemy : zayavl. 01.02.1973 : opubl. 30.06.1975, byul. № 24 / Ivanov, N.V., Krasnov, I.A., Mozgalevskij, A.V., Yudin, Yu.V. (In Russian)]
3. *Ray, A., Luck, R.* An Introduction to Sensor Signal Validation in Redundant Measurement Systems // IEEE Contr. Syst. Mag. – 1991. – Vol. 11, no. 2. – P. 44–49.
4. *Chow, E.Y., Willsky, A.S.* Issues in the Development of a General Algorithm for Reliable Failure Detection // Proceedings of the 19th Conf. on Decision & Control. – Albuquerque, 1980.
5. *Основы технической диагностики.* В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: «Энергия», 1976. – 464 с. [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. V 2-h knigah. Kn. 1. Modeli ob'ek-tov, metody i algoritmy diagnoza / Pod red. P.P. Parhomenko. М.: «Energija», 1976. – 464 s. (In Russian)]
6. *Мозгалецкий А.В.* Техническая диагностика (непрерывные объекты) (обзор) // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 145–166. [Mozgalevskij, A.V. Technological Diagnostics. Continuous Objects (Survey) // Automation and Remote Control. – 1978. – No. 1. – P. 145–166. (In Russian)]
7. *Шумский А.Е., Жирабок А.Н.* Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. – Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2009. [Shumskij, A.E., Zhirabok, A.N. Metody i algoritmy diagnostirovaniya i otkazoustojchivogo upravleniya dinamicheskimi sistemami. – Vladivo-stok: Izd. DVGTU, 2009. (In Russian)]
8. *Кулида Е.Л., Лебедев В.Г.* Современные подходы к диагностике и прогнозированию технического состояния электромеханического привода летательного аппарата // Проблемы управления. – 2024. – № 3. – С. 3–19. [Kulida, E.L. and Lebedev, V.G. Modern Approaches to Prognostics and Health Management of an Aircraft Electromechanical Actuator // Control Sciences. – 2024. – No. 3. – P. 2–15.]
9. *Diagnosis and Fault-tolerant Control 1: Data-Driven and Model-Based Fault Diagnosis Techniques* / ed. by V. Puig and S. Simani. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.
10. *Мироновский Л.А., Соловьева Т.Н., Шинтяков Д.В.* Оптимизация терминального контроля управляемых динамических систем // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 6 (103). – С. 12–21. [Mironovsky, L.A., Solov'eva, T.N., and Shintyakov, D.V. Fault Detection Pptimization for Controllable Dynamic Systems // Information and Control Systems. – 2019. – No. 6. – P. 12–21. (In Russian)]
11. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 8. – С. 96–121. [Mironovsky, L.A. Functional Diagnosis of Dynamic Systems // Avtomatika I Telemekhanika. – 1980. – No. 8. – P. 96–121. (In Russian)]
12. *Basseville, M.* Detecting Changes in Signals and Systems: A Survey // Automatica. – 1988. – Vol. 24, no. 3. – P. 309–326.
13. *Billings, S.A.* Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains. – Hoboken: Wiley, 2013.
14. *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems* / ed. by R. J. Patton, P. M. Frank, R. N. Clark. – London: Springer-Verlag, 2000.
15. *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Safeprocess'91* / ed. by R. Isermann, B. Freyermuth. – Oxford: Pergamon Press, 1992.
16. *Чернодаров А.В.* Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительных вычислительных комплексов. – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2017. – 300 с. [Chernodarov, A.V. Kontrol', diagnostika i identifikaciya aviacionnyh priborov i izmeritel'nyh vychislitel'nyh kompleksov. – М.: ООО «Nauchtekhlitizdat», 2017. – 300 s. (In Russian)]
17. *Jazwinski, A. H.* Stochastic Processes and Filtering Theory. – New York: Academic Press, 1970.
18. *Тотиев Д.А., Виниченко С.Н.* Применение фильтра Калмана для обработки сигналов с измерительных устройств // Сб. науч. тр. кафедры автоматки и промышленной электроники. – М.: Изд. РГУ им. А. Н. Косыгина. – 2024. – С. 165–168. [Totiev, D.A., Vinichenko, S.N. Primenenie fil'tra Kalmana dlya obrabotki signalov s izmeritel'nyh ustrojstv // Sb. nauch. tr. kafedry avtomatiki i promyshlennoj elektroniki. – М.: Izd. RGU im. A. N. Ko-sygina. – 2024. – P. 165–168. (In Russian)]
19. *Буков В.Н., Бронников А.М., Попов А.С., Шурман В.А.* Методы мониторинга технического состояния систем в целях управления их избыточностью. Ч. 1. Встроенные средства контроля и разбиение на классы // Проблемы управления. – 2025. – № 2. – С. 3–13. [Bukov, V.N., Bronnikov, A.M., Popov, A.S., Shurman, V.A. Technical Condition Monitoring Methods to Manage the Redundancy of Systems. Part I: Built-in Control and Partition into Classes // Control Sciences. – 2025. – No. 2. – P. 2 – 10.]
20. *Chen, J., Patton, R. J.* Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. – Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1999.
21. *Frank, P.M.* Enhancement of Robustness on Observer-Based Fault Detection // Int. J. of Control. – 1994. – Vol. 59, no. 4. – P. 955–983.



22. Frank, P.M., Ding, X. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-Based Fault Detection System // J. of Process Control. – 1997. – Vol. 7, no. 6. – P. 403–424.
23. Liu, G.P., Patton, R.J. Eigenstructure Assignment for Control System Design. – Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
24. Zhirabok, A.N., Shumsky, A.Y., Suvorov, A.Y. Observer-Based Robust Fault Diagnosis: Logic-Dynamic Approach // Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). – Reykjavik, Iceland, 2013. – P. 239–244.
25. Isermann, R. Estimation of Physical Parameters for Dynamic Processes with Application to an Industrial Robot // Int. J. of Control. – 1992. – Vol. 55. – P. 1287–1298.
26. Clark, R.N. Instrument Fault Detection // IEEE Trans. Aero. & Electronic Systems. – 1978. – Vol. 14, no. 3. – P. 455–465.
27. Willsky, A.S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems // Automatica. – 1976. – Vol. 12, no. 6. – P. 601–611.
28. Wünnenberg, J., Frank, P.M. Sensor Fault Detection via Robust Observer // System Fault Diagnosis, Reliability, and Related Knowledge-Based Approaches / ed. by S. Tzafestas, M. Singh, G. Schmidt. – Cham, Switzerland: Springer, 1987.
29. Frank, P.M. Advances in Observer-Based Fault Diagnosis // Proceedings of TOOLDIAG'93 Conference. – Toulouse, France, 1993. – P. 817–836.
30. Жирабок А.Н., Зувев А.В. Интервальные наблюдатели для оценивания неизвестных входов в дискретных стационарных динамических системах // Автоматика и телемеханика. – 2024. – № 8. – С. 3–19. [Zhirabok, A.N. and Zuev, A.V. Interval Observers for Estimating Unknown Inputs in Discrete Time-Invariant Dynamic Systems // Automation and Remote Control. – 2024. – Vol. 85, iss. 8. – P. 747–760.]
31. Beard, R.V. Failure Accommodation in Linear Systems through Self-Reorganisation: Technical Report MVT-71-1. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Man Vehicle Lab., 1971.
32. Jones, H.L. Failure Detection in Linear Systems : PhD Thesis. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics, 1973.
33. Chen, J., Patton, R.J., Zhang, H.Y. Design of Unknown Input Observer and Robust Fault Detection Filters // Int. J. Control. – 1996. – Vol. 63, no. 1. – P. 85–105.
34. Gertler, J. Generating Directional Residuals with Dynamic Parity Equations // Proceedings of the IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS'91. – Baden-Baden, 1991.
35. Patton, R.J., Chen, J. A Review of Parity Space Approaches to Fault Diagnosis for Aerospace Systems // AIAA J. of Guidance, Contr. & Dynamics. – 1994. – Vol. 17, no. 2. – P. 278–285.
36. Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application / ed. by R.J. Patton, P.M. Frank, R.N. Clark. – London: Prentice Hall, 1989.
37. Chow, E.Y., Willsky, A.S. Analytical Redundancy and the Design of Robust Detection Systems // IEEE Trans. Automatic Control. – 1984. – Vol. 29, no. 7. – P. 603–614.
38. Бритов Г.С., Мироновский Л.А. Метод избыточных переменных для контроля звеньев с дробно-рациональными передаточными функциями // Информ. материалы НС по проблеме «Кибернетика» АН СССР. – 1971. – № 3. [Britov, G.S., Mironovskij, L.A. Metod izbytochnyh peremennyh dlya kontrolya zven'ev s drobno-racional'nymi peredatochnymi funkciyami // Inform. materialy NS po probleme «Kibernetika» AN SSSR. – 1971. – No. 3. (In Russian)]
39. Игнатьев М.Б., Катермина Т.С. Метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 3 (26). – С. 234–252. [Ignat'ev, M.B., Katermina, T.S. Metod izbytochnyh peremennyh dlya kontrolya i korrekcii vychislitel'nyh processov v real'nom vremeni // Trudy SPIIRAN. – 2013. – Вып. 3 (26). – С. 234–252. (In Russian)]
40. Жирабок А.Н., Кучер Д.Н. Метод повышения робастности при диагностировании // Вологодские чтения. – 2008. – № 69. – С. 6–9. [Zhirabok, A.N., Kucher, D.N. Metod povysheniya robastnosti pri diagnostirovaniі // Vologdinskie chteniya. – 2008. – No. 69. – P. 6–9. (In Russian)]
41. Emami-Naeini, A., Akhter, M., Rock, M. Effect of Model Uncertainty on Failure Detection: The Threshold Selector // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1988. – Vol. 33, no. 2. – P. 1106–1115.
42. Frank, P.M., Ding, S.X., Köpper-Seliger, B. Current Developments in the Theory of FDI // SAFEPROCESS'00: Preprints of the IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Vol. 1. – Budapest, Hungary. – London: Elsevier Ltd., 2000.
43. Zhou, K., Doyle, J. C., Glover, K. Robust and Optimal Control. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 10.11.2024,
после доработки 23.04.2025.
Принята к публикации 16.06.2025.

Буков Валентин Николаевич – д-р техн. наук, АО «Бортовые аэронавигационные системы», г. Москва,
✉ v_bukov@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5194-8251>

Бронников Андрей Михайлович – д-р техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ✉ bronnikov_a_m@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-1216-3521>

Попов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, ✉ saga30@yandex.ru,

Шурман Владимир Александрович – АО «НИИ авиационного оборудования», г. Жуковский, ✉ shurman@niiao.ru

© 2025 г. Буков В. Н., Бронников А. М., Попов А. С., Шурман В. А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

TECHNICAL CONDITION MONITORING METHODS TO MANAGE THE REDUNDANCY OF SYSTEMS. PART II: Classical Models

V. N. Bukov*, A. M. Bronnikov**, A. S. Popov***, and V. A. Shurman****

*Airborne Aeronautical Systems, Moscow, Russia

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

***Zhukovsky–Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

****Institute of Aircraft Equipment, Zhukovsky, Russia

*✉ v_bukov@mail.ru, **✉ bronnikov_a_m@mail.ru, ***✉ saga30@yandex.ru, ****✉ shurman@niiao.ru

Abstract. Redundancy management of a technical system involves a monitoring procedure (control of the current state of its components) to reconfigure the system as needed. Consisting of four parts, this survey presents modern and newly developed technical condition monitoring methods for redundancy management. Part I was devoted to a general description of built-in control tools, voting schemes, and fidelity rules; control codes and program execution control methods were briefly covered. Part II of the survey considers diagnosis methods based on the classical modeling of the system diagnosed in the discrete time and frequency domains. The Chow–Willsky fault detection scheme, as well as the definition of a residual and its generation procedures in the diagnosis problem, are presented. The main model-based diagnosis methods using equation errors, observers, parity equations, and redundant variables are described. In conclusion, the robustness problem of diagnosis methods of the corresponding type is briefly discussed.

Keywords: technical condition monitoring, redundancy management, diagnosis, residual, analytical models of systems, equation error method, observers, Beard filter, fault detection via parity equations, redundant variable method, robustness of methods.