

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500

УДК 681.5.09

Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока

Никита Сергеевич Колесник¹✉, Алексей Анатольевич Маргун^{1,2}

^{1,2} Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ nik.kolesnik.1998@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8630-4202>

² alexeimargun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5333-0594>

Аннотация

Предмет исследования. Исследован современный подход к решению проблемы детектирования отказов двигателей постоянного тока. Предложен алгоритм онлайн-оценки работоспособности двигателя постоянного тока при различных нагрузках. **Метод.** Метод детектирования основан на использовании набора наблюдателей Люенбергера полного порядка. Схема локализации построена с применением направленных генераторов рассогласования и оценки соотношений между вектором ошибки наблюдения и векторами рассогласования для различных видов отказов. **Основные результаты.** Разработана процедура синтеза алгоритма детектирования и локализации отказов двигателей постоянного тока. Выполнено компьютерное моделирование на примере двигателя постоянного тока РК 370СА при условиях: отказа из-за неучтенного момента силы, действующего на ротор; отклонения входного напряжения от заданного; сбоя датчиков скорости и тока. В результате эксперимента выявлено корректное определение состояния двигателя (наличие отказа) и причины отказа. Проведено сравнение предложенного подхода с решениями, основанными на аппаратной и временной избыточностях, подходах идентификации и синтеза наблюдателей. Определено преимущество подхода — возможность детектирования и локализации отказов как по входным, так и по выходным сигналам при тривиальной процедуре синтеза и отсутствии необходимости расширения аппаратной части системы. Представленный метод применим для линейных систем второго порядка, а также может быть развит для объектов старшего порядка при необходимом изменении систем уравнений, решаемых при построении наблюдателей. **Практическая значимость.** Предложенный метод позволяет производить онлайн-локализацию отказов и не требует дополнительных средств измерения, что способствует сокращению расходов на диагностику, экономии времени ремонта и обслуживания, своевременному обнаружению аварий. Результаты работы могут найти применение в разработке систем управления двигателями постоянного тока для повышения надежности и отказоустойчивости.

Ключевые слова

детектирование отказов, локализация отказов, двигатель постоянного тока, направленный генератор рассогласований

Благодарности

Исследование частично проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-0898. Работа частично выполнена в ИПМаш РАН при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

Ссылка для цитирования: Колесник Н.С., Маргун А.А. Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 492–500. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500

DC motor fault detection and isolation scheme with the use of directional residual set

Nikita S. Kolesnik¹✉, Alexey A. Margun^{1,2}

¹ IPMash RAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

² ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ nik.kolesnik.1998@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8630-4202>

² alexeimargun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5333-0594>

Abstract

The subject of research is presented as online-estimation of characteristics of DC motors under various loads. The paper is devoted to a modern approach to solve the problem of detecting DC motor failures. Proposed detection method is based on the set of full state Luenberger observers. Isolation scheme uses directional residual set and relationships between fault direction and residual vector. The procedure of synthesizing the fault detection and isolation algorithm for DC motor is designed. This scheme performance is proved with computer modeling of typical DC motor RK 370CA with faults caused by unaccounted force momentum acting on rotor, input voltage disturbance, velocity and current sensors failures. The algorithm correctly defines motor state (fault presence or absence) and also properly isolates fault cause. Proposed method advantage is compared to other solutions based on hardware and timing redundancy, identification and observers lies in the opportunity to detect and isolate faults of input and output signals with trivial synthesis and absence of the need to expand system hardware. Proposed method is applicable to any second order system, and also there is a possibility to use it for higher order systems with the corresponding changing of the equation systems solving for observer synthesis. This algorithm allows realizing online fault isolation and does not require additional measuring which promotes decrease of diagnostic costs, repair and serving time saving, modern accident detection. The results can be applied to DC motor control to increase reliability and to develop DC motor control systems.

Keywords

failure detection, failure isolation, DC motor, directional residual generator

Acknowledgements

Research has been partially made with support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, government order № 2019-0898; this work has been partially completed in IPME RAS with support of government order № 121112500298-6 (USAIS RDCW).

For citation: Kolesnik N.S., Margun A.A. DC motor fault detection and isolation scheme with the use of directional residual set. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 492–500 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500

Введение

Развитие современных технологий привело к автоматизации процессов в различных областях человеческой деятельности: машиностроении, химической промышленности, энергетике, пищевой промышленности и др. Такие системы, как правило, имеют сложную структуру, которая включает взаимосвязанные датчики, актуаторы (источники управляющих сигналов, например, для вала электродвигателя актуатором является драйвер, который служит источником напряжения) и пассивные элементы. Многие из элементов подвержены износу и выходу из строя под влиянием внешних факторов. Своевременное детектирование и локализация отказов имеет особое значение на производстве, так как позволяет предотвратить травмы и возникновение аварийных ситуаций, снизить финансовые потери, что особенно важно на предприятиях критической инфраструктуры [1]. Наличие таких технологий позволяет повысить надежность, своевременно проводить профилактическое обслуживание, эффективно проводить реконфигурацию объектов для быстрого устранения неисправностей.

В соответствии с [2] отказы могут быть классифицированы следующим образом:

- отказ компонента (отклонение параметра объекта от номинального значения или изменение структуры системы);

— отказ датчика (показания датчика не соответствуют измеряемой физической величине);

- отказ актуатора (отклонение сигнала управления от заданного значения).

Самые распространенные методы детектирования и локализации отказов основаны на наблюдателях, анализе соотношений сигналов и алгоритмах идентификации. Методы анализа соотношений базируются на аппаратной или временной избыточности. Аппаратная избыточность заключается в использовании дублирующих устройств. Данный подход обладает высокой эффективностью и не нуждается в наличии модели системы, но требует значительных дополнительных экономических издержек [3]. Также добавление большого количества датчиков может быть невозможно из-за технологических ограничений. Использование временной избыточности основывается на анализе показаний датчиков за некоторый промежуток времени и их сравнении с номинальной моделью. Недостаток данного подхода — наличие достаточно точной модели объекта управления. Методы на основе избыточности показывают высокую эффективность при диагностировании датчиков.

Подходы, основанные на наблюдателях [4], используют разницу между оценками и измеренными значениями переменных состояния (рассогласование) для определения отказов. Как правило, для этого строят генераторы рассогласования [5] — специальные алго-

ритмы, которые позволяют сделать вывод о наличии отказа и его причине по отклонению показаний наблюдателя от измерений. Проблема локализации может быть решена синтезом структурированных генераторов рассогласования, направленных генераторов рассогласования или с помощью специализированных фильтров [6]. Проблема обеспечения робастности в условиях возмущений, шумов и аддитивных нелинейностей может быть решена применением наблюдателей с неизвестным входом [7]. Однако синтез наблюдателя такого типа возможен только для класса линейных систем с существенными ограничениями на матрицы объекта управления. Недостаток данного подхода — потребность в точной модели объекта управления, сложности синтеза при наличии отказов компонентов и построения генераторов рассогласования при множественных отказах.

Идентификационный подход основан на онлайн-оценке параметров объекта управления (например, с использованием градиентного спуска, метода наименьших квадратов, динамического расширения и смешивания регрессора) [8]. Отметим, что не всегда возможно установить однозначную связь между изменением параметра и отказом. Недостаток данного подхода — длительное время реакции.

В [9] рассмотрена задача обнаружения и локализации отказов в системах управления морскими подвижными объектами. В работе проанализирована применимость данного метода для разработки надежной системы автоматического обнаружения и локализации отказов на примере отказов вертикального руля и датчика, измеряющего угол отклонения руля для различных морских судов.

В работе [10] приведены преимущества использования метода измерения во временной области для оперативной локализации отказов сложных компонентов и устройств в полевых условиях. Для реализации метода измерения предпочтительнее применять векторные анализаторы цепей.

В [11] представлен метод обнаружения, локализации и конкретизации отказов исполнительных устройств в замкнутой линейной системе управления авиационным газотурбинным двигателем. Оптимальные наблюдатели гипотез о конкретных отказах исполнительных устройств применяют вместо координат управления таких устройств выбранные заранее постоянные значения, которые ставятся в соответствие конкретным видам отказов каждого устройства.

В работах [12, 13] рассмотрены проблемы разработки систем управления современными авиационными газотурбинными двигателями. Выполнен анализ возможности применения нейронных сетей для диагностики отказов, и приведен алгоритм обнаружения (коррекции) неисправности датчика канала обратной связи на основе нейронной сети. Для данного метода необходимы высокие вычислительные мощности, а также объемные наборы данных для обучения нейронной сети.

На основе перечисленных недостатков и ограничений разработан алгоритм детектирования и локализации отказов актуатора и датчиков для двигателей

постоянного тока (ДПТ). Отметим, что наблюдатели с неизвестным входом для данного класса систем не существуют. Описан простой с точки зрения синтеза метод с низкой вычислительной сложностью. Предположено, что двигатель оборудован датчиками скорости и тока. Детектирование отказов основано на наблюдателе Люенбергера полного порядка, а схема локализации — на множестве направленных генераторов рассогласования. Применение предложенного метода возможно для любой наблюдаемой системы второго порядка. Также данный подход может быть распространен на системы старших порядков при соответствующем изменении систем уравнений, решаемых для построения наблюдателей.

Постановка проблемы

Рассмотрим модель ДПТ, оборудованного датчиками скорости и тока. Динамика двигателя описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri &= u - E_b, \\ J\dot{\omega} &= M - M_f, \end{aligned}$$

где L — индуктивность; R — сопротивление якоря; i — сила тока; u — входное напряжение; E_b — ЭДС самоиндукции; ω — угловая скорость вращения ротора; моменты: J — инерции ротора, M — силы двигателя и M_f — силы трения,

$$\begin{aligned} E_b &= k_b \Phi \omega, \\ M &= k_m \Phi i, \\ M_f &= k_f \omega, \end{aligned}$$

где k_b , k_m и k_f — константы; Φ — магнитный поток. Предположим, что параметры ДПТ постоянны и известны.

Перепишем уравнения системы в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ — векторы состояния и выходного сигнала; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы системы, управления и выхода:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{k_f}{J} & \frac{k_m \Phi}{J} \\ -\frac{k_b \Phi}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим динамику двигателя при следующих отказах: внешний момент силы приложен к ротору (отказ актуатора); отклонение входного напряжения (отказ актуатора); отказ датчика скорости; отказ датчика тока.

Отклонение момента силы и напряжения классифицированы как отказы актуатора, так как они напрямую действуют на производные вектора состояния.

Отклонение величины напряжения от заданного значения, превышающее некоторое пороговое значение, устанавливаемое оператором. Как правило, оно должно быть выше амплитуды шумов, чтобы предотвратить ложное срабатывание.

Модель (1) в случае наличия перечисленных отказов описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{a1} \\ f_{a2} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

где f_{a1} — внешний момент силы; f_{a2} — отклонение напряжения; f_{s1} — сигнал отказа датчика скорости; f_{s2} — сигнал отказа датчика тока. Данные сигналы неизвестны.

Структурная схема исследуемой модели приведена на рис. 1.

Схема детектирования и локализации

Основой разрабатываемого подхода является наблюдатель состояния Люенбергера полного порядка [14]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}), \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{y}}$ — оценки векторов состояния и выходных сигналов; $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$ — матрица наблюдателя.

Сигнал рассогласования выберем как разницу между выходным сигналом объекта и выходом наблюдателя (3):

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{C}\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}},$$

где $\mathbf{e}$ — ошибка оценки.

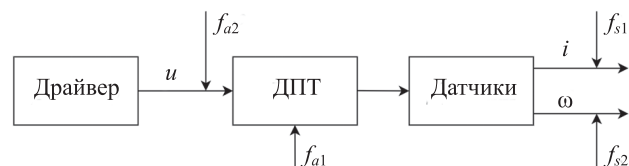


Рис. 1. Структурная схема модели исследуемого объекта

Fig. 1. Structural scheme of plant model

Динамическая модель сигнала рассогласования имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{e} + \mathbf{I}_i f_i, \\ \mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{e}, \end{cases}$$

где вектор $\mathbf{I}_i$ определяет направление отказа в пространстве рассогласования; f_i — i -й сигнал отказа.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм синтеза $\mathbf{K}$ для каждого отказа, обеспечивающий выполнение следующих условий [3].

Условие 1. $\text{rank}[\mathbf{I}_i; (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{I}_i] = 1$ для обеспечения изменения сигнала рассогласования при отказе строго вдоль одного вектора в пространстве рассогласования.

Условие 2. Матрица $(\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})$ должна быть гурвицевой для обеспечения устойчивости наблюдателя.

Условие 3. Все векторы $\mathbf{C}\mathbf{I}_i$ должны быть линейно независимы для разделимости отказов.

Отметим, что одновременные отказы могут быть разделены, если все наблюдатели удовлетворяют Условиям 1–3.

Детектирование и локализация отказа по внешнему моменту сил, приложенному к ротору

Построим алгоритм синтеза наблюдателя для каждого отказа и разработаем схему локализации на базе рассогласования сигналов (рис. 2). Выполним анализ динамики ДПТ при различных сбоях.

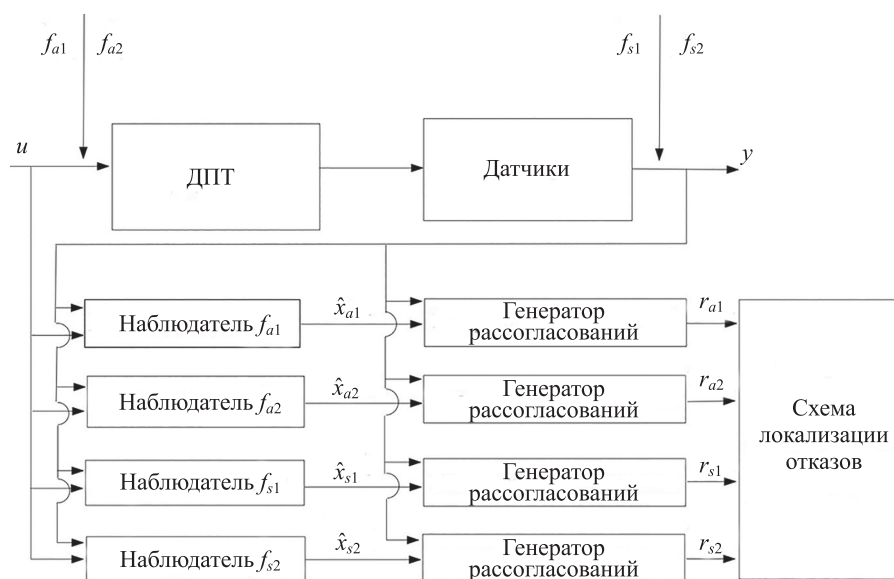


Рис. 2. Схема детектирования и локализации отказов

Fig. 2. Fault detection and isolation scheme

Отказ по внешнему моменту сил, приложенному к ротору, происходит, когда некоторая неучтенная сила воздействует на вращающиеся механические части (например, увеличивается сила трения в связи с износом подшипников или возникает внешний момент сил из-за механической поломки и т. д.). Динамика ошибки имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I}_{a1}f_{a1}, \\ \mathbf{I}_{a1}^T &= \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \end{bmatrix} = [l_1 \quad 0],\end{aligned}\quad (4)$$

где f_{a1} — внешняя сила, действующая на ротор.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$\text{rank}[\mathbf{I}_{a1}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I}_{a1}] = \text{rank} \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & (a_1 - k_1)l_1 \\ 0 & (a_3 - k_3)l_1 \end{bmatrix} = 1.$$

Оно выполняется, если $k_3 = a_3$:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & (a_1 - k_1)l_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = 1.$$

Рассмотрим *Условие 2*. Характеристический полином уравнения (4) имеет вид:

$$p_{a1} = \det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{KC})) = s^2 + ms + n,$$

где s — комплексная переменная,

$$m = k_1 - a_1 - a_4 + k_4, \quad (5)$$

$$n = k_1a_4 - a_1a_4 + k_1k_4 - a_1k_4 - k_2k_3 + a_2k_3 + a_3k_2 - a_2a_3.$$

Характеристический многочлен не зависит от k_2 , так как $k_2k_3 = a_3k_2$ и $a_2k_3 = a_2a_3$. Таким образом, определим $k_2 = 0$. Выберем положительное значение n , m для обеспечения желаемого поведения наблюдателя и завершения вычисления $\mathbf{K}$ путем решения уравнений (5) относительно k_1, k_4 .

Условие 3 выполняется, так как рассматривается только один вектор направления рассогласования.

Детектирование и локализация отказа при отклонении напряжения

Отказ при отклонении напряжения возникает из-за сбоя в электронных схемах или источнике питания (например, сбой транзистора в драйвере двигателя или влияние мощного внешнего магнитного поля). Динамика ошибки наблюдения принимает форму

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I}_{a2}f_{a2}, \\ \mathbf{I}_{a2}^T &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} = [0 \quad l_2],\end{aligned}\quad (6)$$

где f_{a2} — аддитивное напряжение, подаваемое на вход ДПП.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$\text{rank}[\mathbf{I}_{a2}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I}_{a2}] = \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & (a_2 - k_2)l_2 \\ \frac{1}{L} & (a_4 - k_4)l_2 \end{bmatrix} = 1.$$

Условие 1 выполняется, если $k_2 = a_2$:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & (a_4 - k_4)l_2 \end{bmatrix} = 1.$$

Рассмотрим *Условие 2*. Характеристический многочлен модели ошибок (6) такой же, как и для случая отказа по внешнему моменту сил (5). Он не зависит от k_3 , так как все слагаемые с k_3 сокращаются из-за $k_2 = a_2$. Таким образом, определим $k_3 = 0$. Выберем положительные значения n и m , для обеспечения требуемого поведения наблюдателя с помощью процедуры определения требуемых полюсов и завершения расчета $\mathbf{K}$ решением уравнений (5) относительно k_1, k_4 .

Условие 3 выполняется, поскольку направления $\mathbf{I}_{a1}$ и $\mathbf{I}_{a2}$ ортогональны.

Детектирование отказа датчика скорости

Тип отказа датчика скорости возникает из-за механического или электронного сбоя в датчике скорости или его каналах передачи данных. Наиболее часто сбой проявляется как «залипание» показаний или умножение реального значения на некоторую константу. С учетом системы уравнений (2) динамическая модель ошибки наблюдения имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I}_{s1}f_{s1}, \\ \mathbf{I}_{s1} &= \mathbf{KC} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \end{bmatrix},\end{aligned}$$

где f_{s1} — сигнал отказа датчика скорости.

Направления рассогласования $\mathbf{I}_{a1}$ и $\mathbf{I}_{a2}$ — базисные в двумерном пространстве. Следовательно, невозможно построить одновременно линейно независимый $\mathbf{I}_{s1}$ по отношению к $\mathbf{I}_{a1}$ и $\mathbf{I}_{a2}$. Выберем следующее направление рассогласования $\mathbf{I}_{s1}^T = [k_1 \quad k_3] = [1 \quad 1]$. Если сигнал рассогласования изменяется вдоль выбранного направления, то будет более вероятным. Также можно обеспечить его локализацию одновременно с одним из отказов актуатора.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$\begin{aligned}\text{rank}[\mathbf{I}_{s1}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I}_{s1}] &= \\ = \text{rank} \begin{bmatrix} k_1 & (a_1 - k_1)k_1 + (a_2 - k_2)k_3 \\ k_3 & (a_3 - k_3)k_1 + (a_4 - k_4)k_3 \end{bmatrix} &= 1.\end{aligned}$$

Невозможно выбрать такие k_2 и k_4 , чтобы столбцы были линейно зависимыми, как в случае отказа актуатора. Так как в этом случае наблюдатель имеет нулевой полюс. Для выполнения требования обеспечим линейную зависимость строк:

$$\frac{k_1}{k_3} = \frac{(a_1 - k_1)k_1 + (a_2 - k_2)k_3}{(a_3 - k_3)k_1 + (a_4 - k_4)k_3}. \quad (7)$$

Рассчитаем k_2 как решение уравнения (7):

$$k_2 = \frac{a_1k_1k_3 + a_2k_3^2 - a_3k_1^2 - a_4k_1k_3 + k_1k_3k_4}{k_3^2}.$$

Последний коэффициент k_4 рассчитывается для удовлетворения *Условию 2* с использованием характеристического полинома (5).

Невозможно обеспечить *Условие 3* для всех одновременных отказов, но предлагаемая схема позволяет локализовать отказ датчика скорости одновременно с одним из отказов актуатора.

Детектирование и локализация отказа датчика тока

Причины отказов датчика тока идентичны, как и для датчика скорости. Динамика ошибки описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{e} + \mathbf{I}_{s2}f_{s2},$$

$$\mathbf{I}_{s2} = \mathbf{K}\mathbf{C} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_4 \end{bmatrix},$$

где f_{s2} — сигнал отказа датчика тока.

Выберем направление отказа $\mathbf{I}_{s2}^T = [k_2 \ k_4] = [2 \ -1]$, которое линейно независимо от одного из предыдущих отказов (*Условие 3* частично выполнено).

Рассмотрим *Условие 1*:

$$\begin{aligned} \text{rank}[\mathbf{I}_{s2}; (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{I}_{s2}] &= \\ = \text{rank} \begin{bmatrix} k_2 & (a_1 - k_1)k_2 + (a_2 - k_2)k_4 \\ k_4 & (a_3 - k_3)k_2 + (a_4 - k_4)k_4 \end{bmatrix} &= 1. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\frac{k_2}{k_4} = \frac{(a_1 - k_1)k_2 + (a_2 - k_2)k_4}{(a_3 - k_3)k_2 + (a_4 - k_4)k_4}. \quad (8)$$

Рассчитаем k_3 как решение (8):

$$k_3 = \frac{a_2k_3^2 + a_4k_2k_4 + a_1k_2k_4 - a_2k_4^2 - k_1k_2k_4}{k_2^2}.$$

Последний коэффициент выбирается так, чтобы удовлетворять *Условию 2* с использованием характеристического полинома (5).

Алгоритм локализации

Предложим алгоритм, который позволит детектировать и локализовать отказы с использованием коэффициента, характеризующего соотношения направлений между вектором рассогласования $\mathbf{r}$ и направлениями отказов $\mathbf{I}_i$, аналогично [7]:

$$C_i = \frac{|\mathbf{I}_i^T \mathbf{r}|}{\|\mathbf{I}_i\|_2 \|\mathbf{r}\|_2}.$$

Коэффициент C_i обозначает нормализованное значение проекции рассогласования на направление отказа. Если $C_i > C_j$ то отказ i более вероятен, чем j . Для описанного ДПТ наиболее вероятный отказ соответствует $\max(C_i)$, $i = \{\mathbf{I}_{a1}, \mathbf{I}_{a2}, \mathbf{I}_{s1}, \mathbf{I}_{s2}\}$.

Робастность по отношению к шумам может быть обеспечена с помощью порогового значения:

$$\mathbf{r} = \begin{cases} \mathbf{r}, & \text{если } |\mathbf{r}| \geq \Delta, \\ 0, & \text{если } |\mathbf{r}| \leq \Delta, \end{cases}$$

где Δ — величина порогового значения.

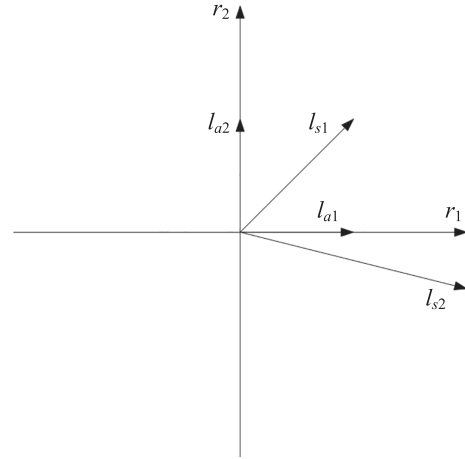


Рис. 3. Направления отказов в пространстве рассогласования

Fig. 3. Fault directions in the residual space

Проблему нечувствительности к параметрическим неопределенностям можно преодолеть с помощью алгоритмов идентификации. В этом случае матрица наблюдателя становится зависимой от динамически оцениваемых параметров объекта управления для выполнения всех необходимых условий.

Отметим, что *Условие 3* не выполняется для всех возможных одновременных отказов. Следовательно, предлагаемая схема может привести к ошибкам локализации в случаях множественных отказов. Например, два одновременных отказа актуатора приводят к увеличению рассогласования в направлении отказа датчика. Однако на практике такая ситуация маловероятна, и алгоритм детектирования остается работоспособным.

Результаты моделирования

Для моделирования выбран ДПТ RK 370CA. В соответствии с рис. 1, на двигатель подается напряжение от драйвера и внешний момент сил, выходными сигналами являются показания датчиков скорости и тока. Двигатель имеет следующую модель пространства состояния [15]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2,0778 \times 10^4 & 2,644 \times 10^4 \\ -0,2474 & -180,5054 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10,618 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Найдем направления отказов актуатора с помощью (5) и (6):

$$\mathbf{I}_{a1} = \begin{bmatrix} 1,11 \times 10^6 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{a2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10,618 \end{bmatrix}.$$

Выберем собственные значения наблюдателей, равные -5 , и рассчитаем матрицы наблюдателей на основе (5) и желаемого характеристического полинома:

$$\mathbf{K}_{a1} = \begin{bmatrix} -2,0773 \times 10^4 & 0 \\ -0,2474 & -175,5054 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{a2} = \begin{bmatrix} -2,0773 \times 10^4 & 2,644 \times 10^4 \\ 0 & -175,5054 \end{bmatrix}.$$

Определим различные направления отказа датчика, не совпадающие с направлениями отказа актуатора:

$$\mathbf{I}_{s1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{s2} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Соответствующие (9) матрицы расчета наблюдателя принимают вид:

$$\mathbf{K}_{s1} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^4 & 5,8484 \times 10^3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{s2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -141,2927 & -1 \end{bmatrix}.$$

ДПТ запускается из состояния покоя. После 0,03 с переходного процесса двигатель начинает работать в установившемся режиме до момента отказа. Время начала отказа выбрано произвольным для разных случаев отказа с целью демонстрации инвариантности алгоритма по отношению к данному фактору.

На рис. 4, а показаны выходные сигналы двигателя (сила тока $i(t)$ и скорость $\omega(t)$) при отказе по внешнему моменту сил спустя 0,4 с после начала моделирования.

Сигнал отказа имеет постоянную амплитуду и увеличивает скорость ДПТ. Соответствующие коэффи-

циенты направлений C_{a1} , C_{a2} , C_{s1} , C_{s2} показаны на рис. 4, б. Наибольшее значение C_{a1} соответствует отказу двигателя.

Случай отказа при отклонении напряжения показан на рис. 5, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и соотношения направлений при возникновении отказа при отклонении напряжения с 0,4 с. Сигнал отказа представляет собой дополнительное гармоническое напряжение, подаваемое на вход двигателя. Коэффициент направлений позволяет локализовать отказ. Однако сигнал отказа ослабевает, когда гармоника близка к нулевому значению.

Случай отказа датчика скорости показан на рис. 6, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и коэффициенты направлений при мультипликативном отказе датчика скорости в 0,6 с. Отказ происходит из-за умножения измеренного значения, которое может быть вызвано искажением информационных фрагментов. Предложенная схема позволяет локализовать отказ этого датчика.

Случай отказа датчика тока показан на рис. 7, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и коэффициенты направлений при мультипликативном отказе датчика тока в 0,6 с.

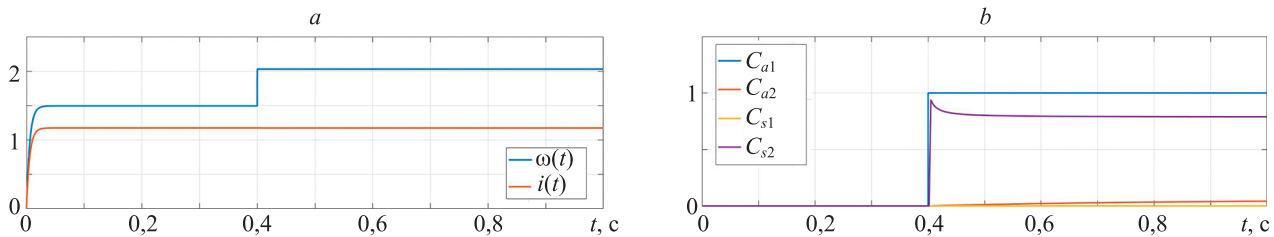


Рис. 4. Случай отказа по внешнему моменту сил: выходные сигналы двигателя (а); коэффициенты направлений (б)

Fig. 4. Case of external force momentum fault: motor output signals (a); direction coefficients (b)

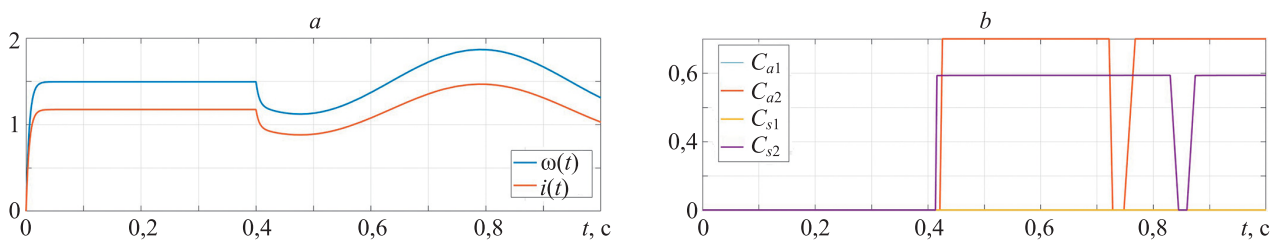


Рис. 5. Случай отказа при отклонении напряжения: выходные сигналы двигателя (а); коэффициенты направлений (б)

Fig. 5. Case of voltage deviation fault: motor output signals (a); direction coefficients (b)

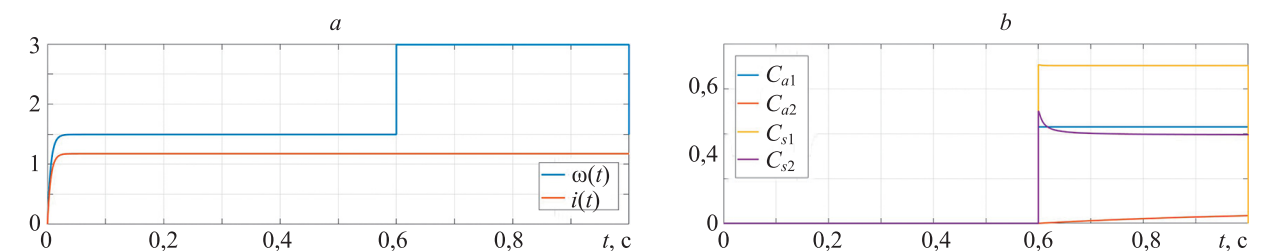


Рис. 6. Случай мультипликативного отказа датчика скорости: выходные сигналы двигателя (а); коэффициенты направлений (б)

Fig. 6. Case of velocity sensor multiplicative fault: motor output signals (a); direction coefficients (b)

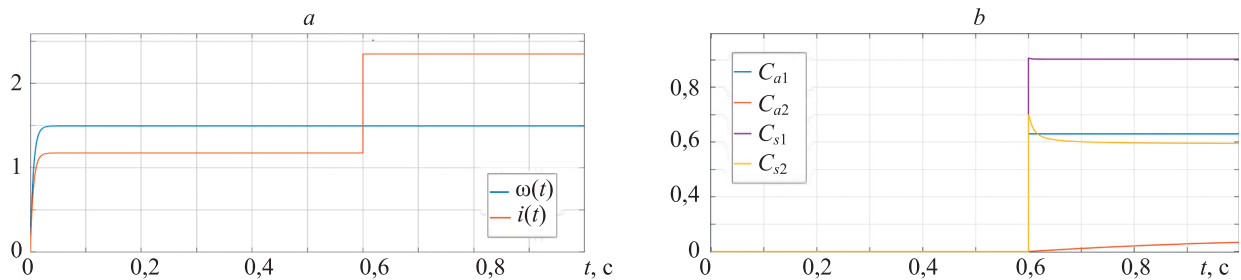


Рис. 7. Случай мультипликативного отказа датчика тока: выходные сигналы двигателя (а); коэффициенты направлений (b)
Fig. 7. Case of current sensor multiplicative fault: motor output signals (a); direction coefficients (b)

Результаты компьютерного моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода. Под эффективностью подразумевается корректность детектирования состояния двигателя (наличие отказа), а также верная локализация причины отказа.

Заключение

Предложен алгоритм детектирования и локализации отказов актуатора и датчиков для двигателя постоянного тока. Принято, что двигатель оснащен датчиками скорости и тока. Алгоритм детектирования основан на наблюдателе Люенбергера полного порядка. Схема локализации использует направленные генераторы рассогласования и соотношения их выходов с направлениями отказов. Описанное решение позволяет определять отказы по внешнему моменту сил, приложенному к ротору; при отклонении величины напряжения от заданного значения, превышающее пороговое значение; датчика скорости; датчика тока.

Предложенное решение отличается использованием банка наблюдателей для локализации отказов,

простым алгоритмом его построения и синтеза генераторов рассогласования. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода. Представленный метод обеспечивает онлайн-локализацию отказов и не требует дополнительных средств измерения, что позволяет сократить расходы на диагностику, сэкономить время ремонта и обслуживания, своевременно обнаруживать аварии. Также алгоритм позволяет детектировать и локализовывать отказы как по входным, так и по выходным сигналам при тривиальной процедуре синтеза.

Устойчивость по отношению к шуму достигается за счет использования порогового значения рассогласования. Нечувствительность к параметрическим неопределенностям может быть достигнута с помощью методов идентификации параметров (градиентный спуск, метод наименьших квадратов, метод динамического расширения регрессора и т. д.).

Рассмотренное решение применимо для любой наблюдаемой системы второго порядка и для объектов старшего порядка при соответствующем изменении систем уравнений, решаемых для построения наблюдателей.

Литература

1. Chen J., Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer Science & Business Media, 2012. 356 p.
2. Wünnenberg J. *Observer-based Fault Detection in Dynamic Systems*. VDI Verlag, 1990. 127 p.
3. Аверьянов А.В., Барановский А.М., Эсаулов К.А. Анализ пределов аппаратной избыточности системы автоматизированного дистанционного управления военного назначения // I-METHODS. 2015. Т. 7. № 4. С. 16–20.
4. Chen J., Patton R., Zhang H.-Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters // *International Journal of Control*. 1996. V. 63. N 1. P. 85–105. <https://doi.org/10.1080/00207179608921833>
5. Козлов Д.С., Тюменцев Е.В. Нейросетевые методы обнаружения отказов датчиков и приводов летательного аппарата // Труды МАИ. 2019. № 52. С. 2.
6. Коровкин М.В., Сотникова М.В. Обнаружение и локализация отказов в системах управления морскими подвижными объектами // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 4. С. 91–94.
7. Oh K.S., Song T.J., Lee J.M., Yoon Y.M., Yi K.S. Sliding mode observer based fault detection and isolation algorithm of sensor for longitudinal autonomous driving using V2V communication // *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 2019. V. 43. N 98. P. 599–609. (in Korean). <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.9.599>

References

1. Chen J., Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer Science & Business Media, 2012. 356 p.
2. Wünnenberg J. *Observer-based Fault Detection in Dynamic Systems*. 1990, VDI Verlag, 127 p.
3. Averyanov A.V., Baranovsky A.M., Esaulov K. Analysis of hardware redundancy limits of the system of automated remote management, military. *I-METHODS*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 16–20. (in Russian)
4. Chen J., Patton R., Zhang H.-Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters. *International Journal of Control*, 1996, vol. 63, no. 1, pp. 85–105. <https://doi.org/10.1080/00207179608921833>
5. Kozlov D.S., Tiumentsev Y.V. Neural network techniques for fault identification of aircraft sensors and actuators. *Trudy MAI*, 2019, no. 52, pp. 2. (in Russian)
6. Korovkin M.V., Sotnikova M.V. Failure detection and localization in the control systems of marine mobile objects. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*, 2013, no. 4, pp. 91–94. (in Russian)
7. Oh K.S., Song T.J., Lee J.M., Yoon Y.M., Yi K.S. Sliding mode observer based fault detection and isolation algorithm of sensor for longitudinal autonomous driving using V2V communication. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 2019, vol. 43, no. 98, pp. 599–609. (in Korean). <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.9.599>
8. Zhao R., Wu Y. Intelligent fault detection and diagnosis method for automatic control system based on reinforcement learning. *Lecture*

8. Zhao R., Wu Y. Intelligent fault detection and diagnosis method for automatic control system based on reinforcement learning // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2021. V. 747. P. 1459–1467. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0115-6_167
9. Zhang Y., Wang K., Qian X., Gendeel M. Robust fault-detection based on residual K–L divergence for wind turbines // *IET Renewable Power Generation*. 2019. V. 13. N 13. P. 2400–2408. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6190>
10. Lim J.K., Park C.G. Satellite fault detection and isolation scheme with modified adaptive fading EKF // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2014. V. 9. N 4. P. 1401–1410. <https://doi.org/10.5370/jeet.2014.9.4.1401>
11. Захаров Н.А., Калинин С.В., Клепиков В.И., Подхвятилин Д.С. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивости распределенных систем управления // *Радиоэлектроника и компьютерные системы*. 2008. № 7(34). С. 43–48.
12. Лейбов Р.Л. Обнаружение, локализация и конкретизация отказов исполнительных устройств линейной системы управления // *Авиакосмическое приборостроение*. 2012. № 8. С. 26–35.
13. Кузнецова Т.А., Августиневич В.Г. Применение нейронной сети для диагностики отказов датчиков канала обратной связи САУ ГТД // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2017. № 4. С. 131–133. <https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-4-131-133>
14. Adouni A., Abid A., Sbata L. A DC motor fault detection, isolation and identification based on a new architecture Artificial Neural Network // *Proc. of the 5th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. 2016. P. 294–299. <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2016.7507054>
15. Santos L.I., Palhares R., D'Angelo M., Mendes J.B., Veloso R., Ekel P. A new scheme for fault detection and classification applied to dc motor // *Trends in Computational and Applied Mathematics*. 2018. V. 19. N 2. P. 327–345. <https://doi.org/10.5540/tema.2018.019.02.327>
- Notes in Electrical Engineering*, 2021, vol. 747, pp. 1459–1467. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0115-6_167
9. Zhang Y., Wang K., Qian X., Gendeel M. Robust fault-detection based on residual K–L divergence for wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2019, vol. 13, no. 13, pp. 2400–2408. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6190>
10. Lim J.K., Park C.G. Satellite fault detection and isolation scheme with modified adaptive fading EKF. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 1401–1410. <https://doi.org/10.5370/jeet.2014.9.4.1401>
11. Zakharov N., Kalin S., Klepikov V., Podkhvatilin D. Algorithmic providing of fault tolerance of the distributed controlling systems. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2008, no. 7(34), pp. 43–48. (in Russian)
12. Leibov R.L. Control system actuator failures detection, isolation and concrete definition. *Aerospace Instrument-Making*, 2012, no. 8, pp. 26–35. (in Russian)
13. Kuznetsova T.A., Augustinovich V.G. The neural network application for fault diagnostics of feedback channels' sensor in automatic control systems of modern aircraft gas-turbine engines. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 131–133. (in Russian). <https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-4-131-133>
14. Adouni A., Abid A., Sbata L. A DC motor fault detection, isolation and identification based on a new architecture Artificial Neural Network. *Proc. of the 5th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 2016, pp. 294–299. <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2016.7507054>
15. Santos L.I., Palhares R., D'Angelo M., Mendes J.B., Veloso R., Ekel P. A new scheme for fault detection and classification applied to dc motor. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 327–345. <https://doi.org/10.5540/tema.2018.019.02.327>

Авторы

Колесник Никита Сергеевич — стажер-исследователь, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8630-4202>, nik.kolesnik.1998@mail.ru

Маргун Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; исследователь, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, [sc 55521791600](https://orcid.org/0000-0002-5333-0594), <https://orcid.org/0000-0002-5333-0594>, alexeimargun@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.11.2021
Одобрена после рецензирования 09.04.2022
Принята к печати 19.05.2022

Authors

Nikita S. Kolesnik — Research Assistant, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8630-4202>, nik.kolesnik.1998@mail.ru

Alexey A. Margun — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, [sc 55521791600](https://orcid.org/0000-0002-5333-0594), <https://orcid.org/0000-0002-5333-0594>, alexeimargun@gmail.com

Received 25.11.2021
Approved after reviewing 09.04.2022
Accepted 19.05.2022