

Сравнительный анализ отказоустойчивости датчиковых и интеллектуальных систем активной безопасности автомобиля

Авторы: Бузников С.Е., Елкин Д.С., Шабанов Н.С.

ВВЕДЕНИЕ

Системный анализ проблемы безопасности движения автомобильного транспорта показывает, что решение этой проблемы сводится к предотвращению столкновений и к снижению тяжести последствий столкновений, если избежать их не удалось.

Наиболее перспективным направлением решения этой проблемы является создание систем активной безопасности и оснащение ими действующего парка автомобилей.

В свою очередь, задача предотвращения типовых столкновений сводится к задаче динамической стабилизации векторов состояния и управления с нестационарными верхними и нижними границами в условиях неполной наблюдаемости и управляемости объекта и неопределенности некоторых границ [1].

Одним из важнейших показателей современных и перспективных автомобильных систем активной безопасности является отказоустойчивость, как свойство системы сохранять функции управления в неполной конфигурации технических средств, возникающей в результате отказов отдельных устройств.

В системах, построенных по классическим датчиковым схемам, в которых каждому измеряемому параметру соответствует датчик первичной информации, как правило, применяется аппаратное резервирование. Этот путь неизбежно ведет к ухудшению практически всех системных показателей, в частности, к увеличению общей стоимости системы, затрат на установку, инструментальную настройку и техническое обслуживание.

Интеллектуальные системы, использующие математические модели и алгоритмы косвенных измерений, могут выполняться в минимальной конфигурации технических средств. Использование в интеллектуальных системах активной безопасности знаний об объекте управления в виде формализованных описаний его свойств позволяет создавать информационную избыточность для значимых переменных решаемых задач, которая собственно и используется для информационного резервирования. В этом случае повышение отказоустойчивости возможно без увеличения количества датчиков первичной информации, что позволяет исключить проблемы, присущие аппаратному резервированию.

Сравнительный анализ отказоустойчивости двух вариантов систем проводился для задачи динамической стабилизации температур перегрева тормозов. В качестве примера

реализации информационного резервирования в интеллектуальной системе активной безопасности ИНКА-СПОРТ [2] рассмотрен способ достраивания оценок температур перегрева тормозов ненаблюдаемых колес автомобиля.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

В качестве математической модели нагрева тормозов используется система уравнений первого закона термодинамики в дифференциальной форме [3], которая решается в системе активной безопасности с помощью конечно-разностных уравнений для температур перегрева y_i^* в дискретном времени:

$$y_i^*(k) = D_{0i}^* \cdot y_i^*(k-1) + \Delta T \cdot (T_{Hi}^*)^{-1} \cdot D_{1i}^* \cdot U_3(k) \cdot \text{mod}\{V_i(k)\}, \quad 1 \leq i \leq 4, \quad \text{где} \quad (1)$$

$$D_{0i}^* = (T_{Hi}^* - \Delta T)(T_{Hi}^*)^{-1}; \quad T_{Hi}^* = C_{Ti}^* (C_{0i}^*)^{-1}; \quad D_{1i}^* = (C_{0i}^*)^{-1} \cdot k_{3i} \cdot R_{Ti} \cdot R_{ci}^{-1}.$$

Настройными параметрами для $1 \leq i \leq 4$ являются T_{Hi}^* – постоянная времени охлаждения i -го тормозного устройства; C_{Ti}^* – теплоемкость i -го тормозного устройства; k_{3i} – коэффициент усиления i -го тормоза; R_{Ti} – радиус i -го тормозного диска (барабана); R_{ci} – свободный радиус i -го колеса. Из настройных параметров C_{Ti}^* и T_{Hi}^* система активной безопасности также получает значение константы теплообмена i -го тормозного устройства C_{0i}^* . Нумерация колес автомобиля принята в соответствии со схемой рис. 1 и распространяется также на тормозные устройства и шины.

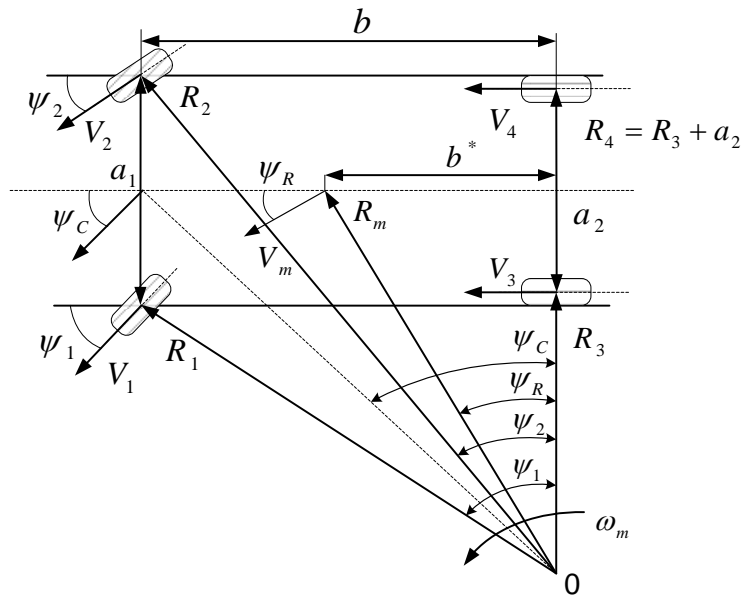


Рис. 1. Кинематическая схема движения легкового автомобиля на вираже.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: b – колесная база автомобиля; ψ_1 и ψ_2 – углы поворота соответственно 1-го и 2-го управляемых колес; ψ_R – угол рысканья; ψ_C – угол поворота управляемых колес; a_1 и a_2 – размеры колеи передних и задних колес; V_i – линейная скорость вращения i -го колеса; R_i – радиусы поворота соответствующих колес; R_m и V_m – соответственно радиус поворота и линейная скорость движения центра масс автомобиля; b^* – расстояние от центра масс до задней оси автомобиля; ω_m – угловая скорость вращения центра масс автомобиля.

Входными данными при использовании системы уравнений (1) являются управляющее тормозное воздействие $U_3(k)$, оценки которого рассматриваемая интеллектуальная система активной безопасности формирует даже при одном рабочем датчике с помощью алгоритма идентификации состояния органов управления [4], и линейные скорости вращения колес.

Система уравнений линейных скоростей вращения колес $V_i = R_i \cdot \omega_m + \Delta V_{Si}$ ($1 \leq i \leq 4$) автомобиля на вираже с учетом продольных скоростей скольжения колес ΔV_{Si} приводится к следующему виду:

$$\begin{cases} V_1 = V_m + 0.5 \cdot a_1 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C + 0.25 \cdot a_1 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C^3 + \Delta V_{S1}; \\ V_2 = V_m - 0.5 \cdot a_1 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C - 0.25 \cdot a_1 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C^3 + \Delta V_{S2}; \\ V_3 = V_m + 0.5 \cdot a_2 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C - 0.5 \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot m_0^{-2} \cdot V_m \cdot \psi_C^2 + \Delta V_{S3}; \\ V_4 = V_m - 0.5 \cdot a_2 \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C - 0.5 \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot m_0^{-2} \cdot V_m \cdot \psi_C^2 + \Delta V_{S4}, \end{cases} \quad (2)$$

m_1 и m_2 – массы, приходящиеся на передние колёса; m_0 – масса автомобиля.

При допущениях о малости угла ψ_C и близости a_1 к a_2 система (2) преобразуется к компактному виду:

$$V_i = V_m - (-1)^i \cdot 0.5 \cdot a \cdot b^{-1} \cdot V_m \cdot \psi_C + \Delta V_{Si}, \quad 1 \leq i \leq 4 \quad (3)$$

Оценки $\hat{V}_i(k) = \hat{R}_{ci}(k) \cdot \hat{\omega}_i(k)$ система ИНКА-СПОРТ при всех исправных датчиках первичной информации формирует на основе измеряемых угловых скоростей вращения колес ω_i .

Решение некорректной задачи определения оценок \hat{V}_m , $\hat{\psi}_C$, $\Delta \hat{V}_{Si}$ ($1 \leq i \leq 4$) по известным оценкам \hat{V}_i , настроечным параметрам a и b на основании (3) приведено в [5]. Информационное резервирование оценок \hat{V}_i для ненаблюдаемых колес основано на

использовании системы уравнений линейных скоростей V_i вращения колес автомобиля на выраже (3). В неполной конфигурации измерительной части системы активной безопасности достраивание оценок $\Delta\hat{V}_{Si}$ и \hat{V}_i ($1 \leq i \leq 4$) выполняется на основании:

$$\begin{cases} \Delta\hat{V}_{Si} = \hat{S}_i \cdot \hat{V}_m; \\ \hat{V}_i = \hat{V}_m - 0.5 \cdot (-1)^i \cdot a \cdot b^{-1} \cdot \hat{V}_m \cdot \hat{\psi}_C + \Delta\hat{V}_{Si}. \end{cases} \quad (4)$$

Адекватная оценка $\hat{\psi}_C$ формируется в случае поступления сигналов с датчиков разных бортов ($i, j = 1, 2; 3, 4; 1, 4; 3, 2$). Если работоспособным остается только один датчик частоты вращения колеса или датчики одного борта ($i, j = 1, 3; 2, 4$), то задается $\hat{\psi}_C = 0$, что совпадает с $\psi_C = 0$ на подавляющем большинстве временных интервалов движения в реальных условиях. Формирование оценки \hat{V}_m в неполной конфигурации датчиков первичных измерений осуществляется аналогично формированию оценки в полной конфигурации путем исключения оценок \hat{V}_i ненаблюдаемых колес.

Оценки скольжений ненаблюдаемых колес \hat{S}_i для использования в системе (4) определяются в результате решения обратной задачи идентификации коэффициентов k_{Si} . Для решения этой задачи вводится допущение, что значения коэффициентов $k_{Si}(S) = k_{Sj}(S)$ для колес одного борта, а в случае отсутствия сигналов датчиков левого или правого бортов, вводится допущение о равенстве $k_{Si}(S) = k_{Sj}(S)$ для всех четырех колес. Данное допущение выполняется при использовании всех четырех шин одной марки и одного типоразмера при движении по однородной поверхности.

Типовые зависимости коэффициента трения скольжения k_{Si} от величины скольжения S_i для колеса автомобиля [6] приведены на рис 2.

Зависимость $|k_{Si}(S_i)|$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией:

$$|k_{Si}(S_i)| = \begin{cases} 0.25 \cdot k_{Si}^*, & \text{если } S_i \neq 0; \\ k_{Si}^* \cdot [0.25 + 5 \cdot |S_i|], & \text{если } 0 < |S_i| \leq 0.15; \\ k_{Si}^*, & \text{если } 0.15 < |S_i| \leq 0.3; \\ \{1.10 - 0.3 \cdot |S_i|\} \cdot k_{Si}^*, & \text{если } 0.3 < |S_i| \leq 3, \text{ где } S_i = \Delta V_{Si} \cdot (V_m)^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

Идентификация k_{Si}^* для наблюдаемых колес выполняется программно [7] в процессе движения автомобиля, оснащенного системой активной безопасности «ИНКА-СПОРТ». Входными данными для решения этой задачи являются измеряемые скольжения S_i колес

и текущие значения коэффициентов трения скольжения k_{Si} , определяемые в соответствии с III законом Ньютона из уравнения равновесия тягово-тормозных сил и сил трения скольжения. Для ненаблюдаемых колес решается обратная задача идентификации S_i при известных k_{Si}^* и вычисленных k_{Si} .

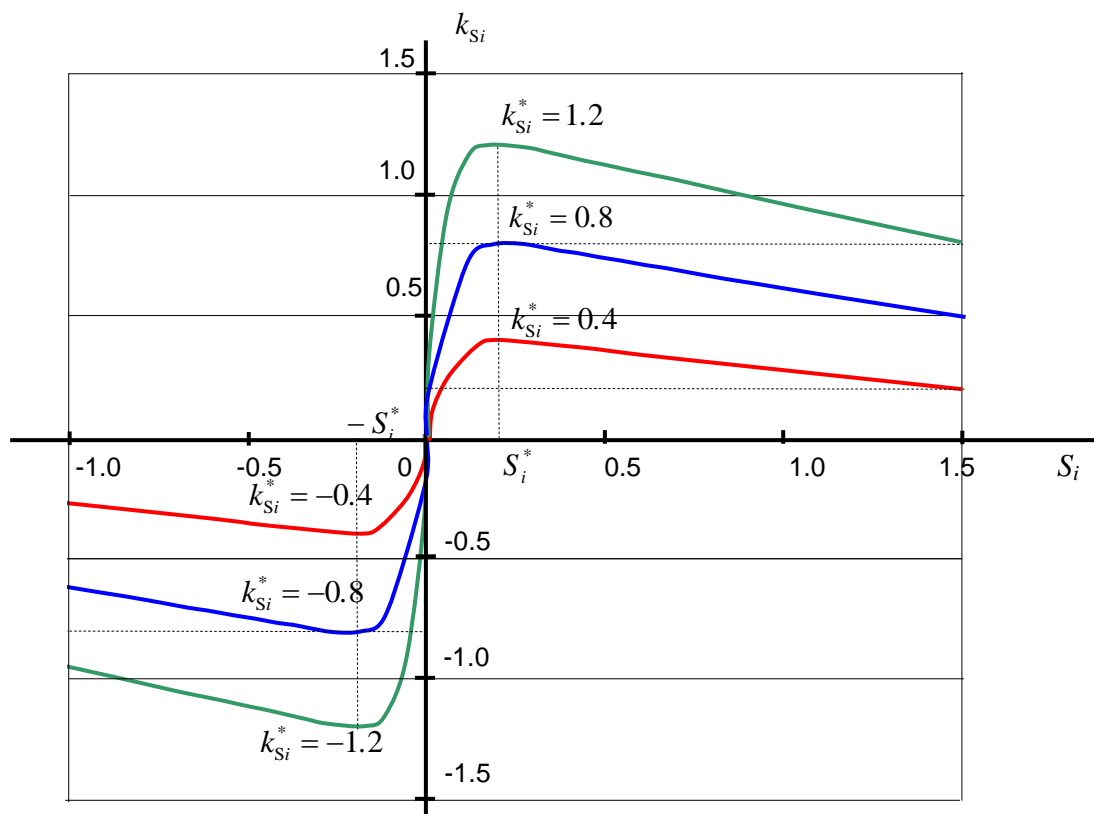


Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения скольжения k_{Si} от скольжения колеса S_i для трех типов поверхностей.

Тягово-тормозная сила F_i уравнивается силой трения скольжения $F_{Si} = F_{Ni} \cdot k_{Si}$, где F_{Ni} – нормальная составляющая динамической нагрузки на i -ое колесо,

$$F_i = [0.5 \cdot M_{Si} \cdot m_0 \cdot a_d - k_{3i} \cdot U_3], \text{ где}$$

$$U_3 = a_T \cdot m_0 \cdot \left(\sum_{i=1}^4 k_{3i} \right)^{-1}, \text{ } a_d \text{ – тяговое ускорение; } a_T \text{ – тормозное замедление; } M_{Si} \text{ –}$$

коэффициент, учитывающий распределение крутящего момента на i -ое колесо.

Модуль $|k_{Si}|$ определяется из уравнения равновесия сил: $|k_{Si}| = |F_i| \cdot F_{Ni}^{-1}$.

Идентификация скольжения S_i ненаблюдаемого i -го колеса осуществляется на основании (5) с использованием доопределяющего условия существования однозначного решения обратной задачи на интервале скольжений $[-S_i^* \div S_i^*]$.

Оценки скольжений \hat{S}_i определяются с учетом знака тягово-тормозных сил F_i на первом линейном участке кусочно-линейной аппроксимации (5):

$$\hat{S}_i = \begin{cases} \text{sgn}(F_i) \cdot |S_i|, & \text{если } |S_i| \geq 0; \\ 0, & \text{если } |S_i| < 0, \text{ где } |S_i| = [0.2 \cdot |k_{Si}| \cdot (k_{Si}^*)^{-1} - 0.05]. \end{cases}$$

Решение обратной задачи идентификации S_i предполагает наличие достоверных оценок k_{Si}^* , которые в условиях эксплуатации могут изменяться в широких пределах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные результаты решения задачи достраивания оценок скоростей и скольжений ненаблюдаемых колес проводились с использованием программы [8], включенной в состав программ системы активной безопасности ИНКА-СПОРТ [9], установленной на переднеприводном легковом автомобиле с известными параметрами настройки модели. На рис. 3 приведены временные диаграммы оценок скольжений $\hat{S}_1(t)$ в условиях изменяющегося угла поворота управляемых колес ψ_C для случая наблюдаемого колеса ($C_1 = 1$) и этого же ненаблюдаемого ($C_1 = 0$) переднего левого ведущего колеса.

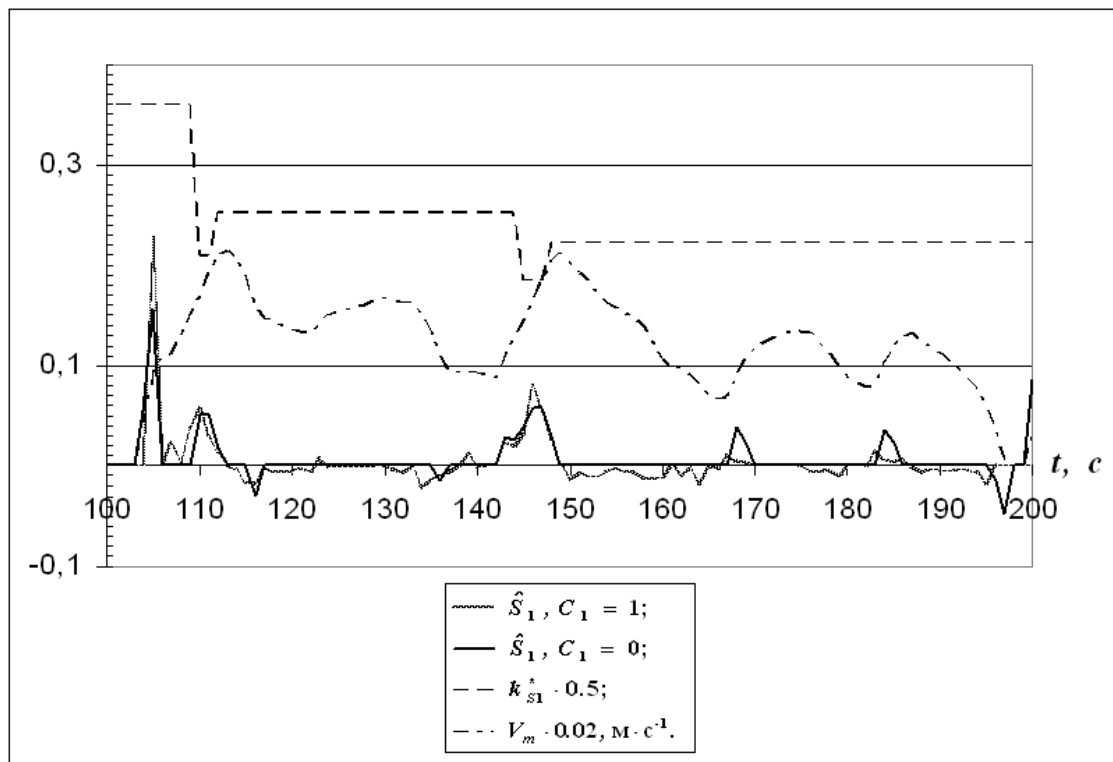


Рис. 3. Экспериментальные временные диаграммы оценок $\hat{S}_1(t)$.

Анализ экспериментальных результатов показывает достаточно высокую сходимость оценок продольных скольжений колес автомобиля для случаев полной и неполной конфигурации измерительной части системы активной безопасности ИНКА-СПОРТ, что свидетельствует об адекватности используемых математических моделей. Различия в оценках на малых скоростях объясняются конечным уровнем порога срабатывания датчиков индукционного типа. Данные временные диаграммы приведены для условий движения по снегу с достаточно низкими значениями k_{Si}^* , которые несколько снижаются в моменты разгонов и возрастают по мере увеличения скорости, что не противоречит свойствам физического процесса таяния снега в пятне контакта шины с поверхностью.

На рис. 4 представлены экспериментальные временные диаграммы оценок температуры перегрева тормозного устройства первого колеса $\hat{y}_1^*(t)$ и результаты дискретных измерений температуры перегрева $\tilde{y}_1^*(t_k)$, проведенные на остановках с помощью контактного цифрового термометра ТМ-211С.

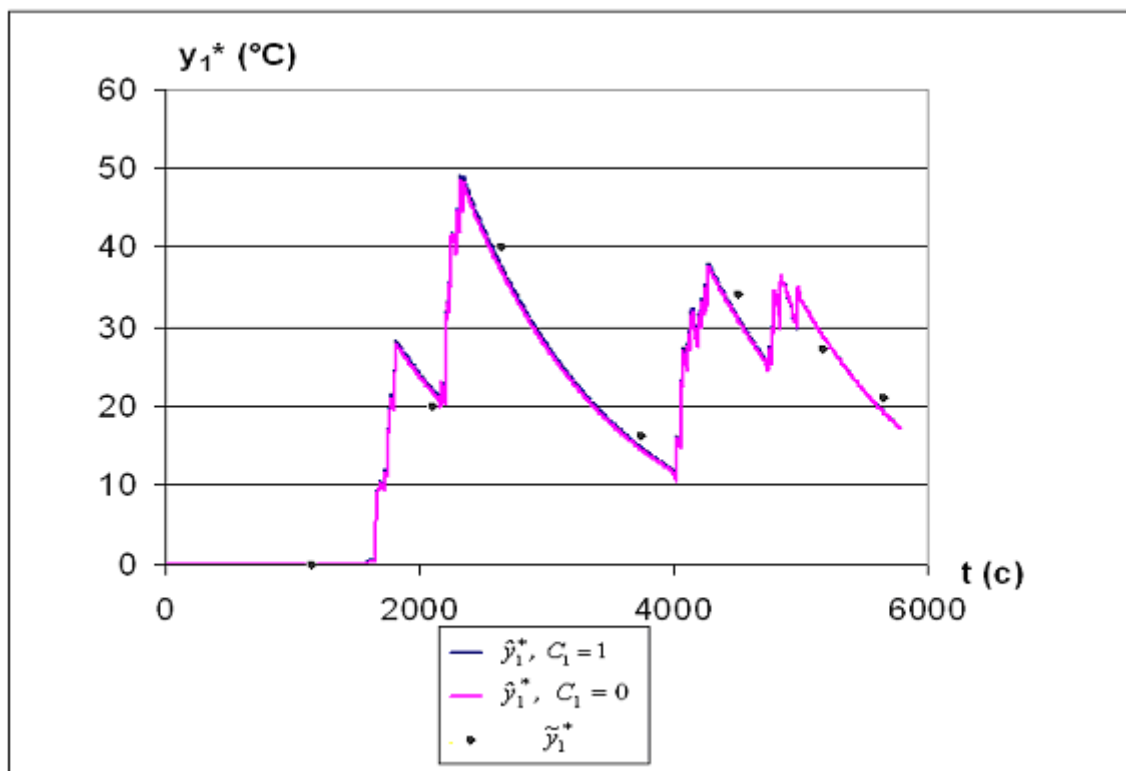


Рис. 4. Экспериментальные временные диаграммы $\hat{y}_1^*(t)$ и $\tilde{y}_1^*(t_k)$.

Уровень ошибок косвенных измерений температур перегрева тормозов не превышает 5%, что позволяет использовать получаемые оценки для решения задачи динамической стабилизации температур тормозов с «размытыми» нижними и верхними границами [3].

Анализ экспериментальных результатов показывает достаточно высокую сходимость оценок $\hat{y}_1^*(t)$ для случаев работающего датчика частоты вращения колеса и отсутствия сигналов с данного датчика, а также высокую сходимость полученных оценок температур с непосредственными измерениями. Это свидетельствует, во-первых, о корректности используемого способа информационного резервирования, во-вторых, не противоречит адекватности используемой математической модели нагрева тормозов автомобиля.

Для объективного оценивания свойства отказоустойчивости используется следующий показатель:

$$Q = \sum_{i=1}^N f_i(c_i) \cdot (f_{\max} \cdot N)^{-1}, \text{ где} \quad (6)$$

$f_i(c_i)$ – число функций, правильно выполняемых системой активной безопасности в состоянии c_i (например, в случае отказа одного или нескольких датчиков первичной информации); f_{\max} – число функций, которые выполняет полностью исправная система; N – количество возможных состояний систем.

Сравнительный анализ отказоустойчивости систем мониторинга температур автомобильных тормозов проводился для систем непосредственных и косвенных измерений.

На рис. 5 приведена диаграмма состояний систем мониторинга температур тормозов для случаев непосредственных и косвенных измерений [10]. Бинарный вектор состояний C_i в рассматриваемом случае может принимать одно из шестнадцати состояний, соответствующих конфигурации исправных датчиков первичной информации.

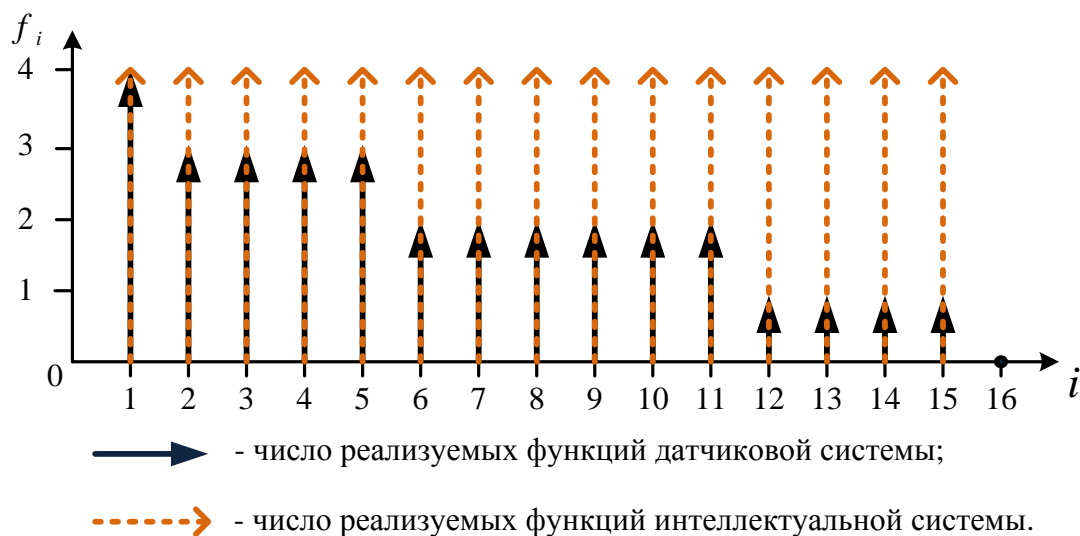


Рис. 5. Зависимость числа выполняемых функций от состояний системы.

Анализ диаграммы показывает, что нерезервированная система непосредственных измерений характеризуется уменьшением числа правильно выполняемых функций в условиях деградации измерительной части. Система косвенных измерений с информационным резервированием, напротив, сохраняет число правильно выполняемых функций вплоть до отказа последнего датчика. Значение показателя отказоустойчивости (б) составляет в первом случае $Q = 0.5$, во втором – $Q = 0.94$.

Особенностью рассмотренной диаграммы является отсутствие на ней состояний, соответствующих отказу бортового компьютера, который входит в рассматриваемые системы, а для интеллектуальных систем является ключевым. Данное допущение основано на том, что надежность современных зарубежных бортовых компьютеров на несколько порядков выше, чем у бесконтактных датчиков первичной информации индукционного типа, обладающих достаточно высоким собственным уровнем надежности.

ВЫВОДЫ

– Информационное резервирование значимых переменных задачи нагрева тормозов, достигаемое за счет введения дополнительных уравнений, позволяет достраивать оценки скоростей ненаблюдаемых колес в случае отказов соответствующих датчиков;

– возможность достраивания оценок значимых переменных задачи сохраняется во всех состояниях измерительной части системы, кроме состояния полной деградации, что позволяет увеличить показатель отказоустойчивости по отношению к нерезервированной системе примерно на 88%;

– уровень ошибок косвенных измерений температур перегрева тормозов не превышает 5%, что позволяет использовать результаты для решения задачи динамической стабилизации температур тормозов в системе реального времени;

– информационное резервирование линейных скоростей вращения колес и скоростей продольных скольжений также используется для решения задач мониторинга температур шин, износов протекторов шин и тормозов в неполной конфигурации датчиков первичной информации;

– в многофункциональной системе активной безопасности ИНКА-СПОРТ для создания информационного резервирования требуется лишь дополнительная программа достраивания оценок продольных скольжений колес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузников С.Е. Современное состояние и перспективы развития автомобильных систем активной безопасности // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XV Международной конференции. – М.: РГГУ, 2007. – С. 207–211.
2. Пат. № 2335805 РФ. Способ предотвращения столкновений автомобиля с препятствиями и система для его осуществления / Бузников С.Е., Елкин Д.С. // Бюл. – 2008. – № 28.
3. Бузников С.Е., Шабанов Н.С. Виртуальные датчики нагрева шин и тормозов автомобиля // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Датчики и системы» – 2009. – № 8 (123). – С. 21–25.
4. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Задача идентификации состояния органов управления автомобиля // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы двенадцатого научно-практического семинара. – М.: МИЭМ, 2009. – С. 184–195.
5. Бузников С.Е. Виртуальные преобразователи информации интеллектуальных систем активной безопасности автомобиля // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы одиннадцатого научно-практического семинара. – М.: МИЭМ, 2008. – С. 126–131.
6. Бакфиш К., Хайнц Д. Новая книга о шинах. – М.: ООО «Издательство Астрель», 2003. – 303 с.
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610818. Идентификация максимальных значений коэффициентов трения скольжения колес автомобиля / Бузников С.Е., Елкин Д.С. // Роспатент, 2007.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613845. Виртуальный преобразователь температур перегрева шин и тормозов автомобиля с достраиванием оценок для ненаблюдаемых колес / Бузников С.Е., Елкин Д.С., Шабанов Н.С. // Роспатент, 2010.
9. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Автомобильная система объективного контроля с регистрацией нарушений ПДД // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XVI Международной конференции. – М.: РГГУ, 2008. – С. 435–439.
10. С.Е. Бузников, Д.С. Елкин, Н.С. Шабанов Анализ отказоустойчивости датчиковых и интеллектуальных систем мониторинга температур тормозов автомобилей // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы тринадцатого научно-практического семинара. – М.: МИЭМ, 2010. – С. 19–27.