

Сигнатурный подход к анализу и обеспечению безопасности системы «человек – машина»

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Предложен сигнатурный подход к анализу и обеспечению безопасности системы «человек-машина». В его основе – динамическая идентификация функционального состояния всех подсистем системы «человек-машина» с помощью сигнатур сигналов ее функционирования. Показано, что подобие по форме представления сигнатур разных по природе сигналов позволяет в режиме реального времени контролировать функционирование всех подсистем. Анализ сигнатур с помощью универсальных параметров и показателей дает возможность своевременно выявлять переходные состояния, которые уменьшают надежность функционирования системы. Для уменьшения влияния человеческого фактора предложены средства анализа пакетов сигнатур физиологических сигналов, в которых индивидуальные особенности переходных функциональных состояний (переутомление, стресс и др.) человека проявляются на ранних стадиях.

Ключевые слова: безопасность системы, переходные состояния, функциональное состояние человека-оператора, адаптация, сигнатуры, человеческий фактор.

Цель и постановка задачи

Обеспечение работоспособности и безопасности системы «человек-машина» (СЧМ) (транспортных, технологических и энергетических комплексов) непосредственно зависит от динамики съема и обработки информации, в которой отображается функционирование всех подсистем [1]. Нарушение согласованности функционирования подсистем вследствие изменения работоспособности человека как подсистемы СЧМ снижает эффективность управления. Учет роли человеческого фактора в безопасности СЧМ предполагает анализ множества психологических, энергетических, информационных и других аспектов [2]. Поэтому оптимизация управления в системе «человек-машина» непосредственно зависит, с одной стороны, от своевременной идентификации переходных функциональных состояний человека (ФСЧ), в которых отображается переутомление, стресс и др., а с другой – от согласованности функционирования всех подсистем СЧМ, включая и человека-оператора. Именно переходные функциональные состояния человека (ФСЧ) рассмотрены в современной концепции профессионального здоровья в качестве основных состояний, которые необходимо контролировать в целях обеспечения безопасности СЧМ [3]. Однако существующие методы экспресс-идентификации переходных состояний всех подсистем не решают основную задачу управления – учета индивидуальных особенностей их динамики.

Многообразие грубых (динамических) и тонких (информационных) индивидуальных особенностей динамического поведения подсистем затрудняет обработку и анализ разных по природе сигналов функционирования [4]. Следствием этого является неоднозначность и противоречивость интерпретации результатов комплексных исследований функционального состояния водителей, пилотов, операторов и др. Кроме того, противоречивы результаты анализа откликов биосенсоров и сенсорных систем контроля в экстремальных условиях эксплуатации. В настоящее время эргономисты, инженеры-медики и др. применяют разные подходы, модели, методы обработки сигналов разной природы. Так, стандартизирован-

ные обществом электрофизиологов США средства анализа физиологических сигналов человека не позволили избежать проблем (неоднозначности и др.) при функциональной диагностике [5]. Поэтому для анализа и прогнозирования поведения сложных динамических систем активно развиваются такие методы, как вейвлет-преобразования, атомарные функции, символьной динамики и др. [6,7]. Несмотря на их многообразие, сегодня не хватает универсальных средств, которые позволили бы системно анализировать безопасность СЧМ. Прогрессу в практическом решении указанных выше проблем способствовало представление сигналов функционирования биологических и технических систем в виде графических образов (фазовых портретов [8], динамических сигнатур [9] и др.).

Индивидуальность сигналов функционирования наиболее проявляется в их сигнатурах. Они состоят из геометрически упорядоченных участков, последовательность которых образует своеобразные циклы. Поэтому динамические сигнатуры сенсоров и биосенсоров различной природы подобны по форме представления [10,11]. Это является следствием динамического подобия соответствующих процессов, теория которого опирается на учение о размерности физических величин [12]. В работе [13] ди Бартони предложил изящный способ геометризации физических величин – выражение их через произведение размерностей длины и времени $[L^l T^k]$, где $l + k \leq 3$ (l, k – целые числа). При этом в предложенной ди Бартони таблице все физические величины связаны между собой посредством операций дифференцирования и интегрирования. Это натолкнуло на идею – подобным образом осуществить трансформирование разных по природе сигналов функционирования (кардиосигнал, отклик сенсора и др.) в сигнатуры 1-го и 2-го порядков [14]. Реализация идеи показала, что среди разнообразия сигнатур ЭКГ человека встречаются конфигурации, которые геометрически подобны сигнатурам переходного фотоотклика (ФО) полупроводникового сенсора [15]. С одной стороны, геометрическое подобие составляющих конфигураций сигнатур биологических и физических систем отображает подобие динамических процессов. С другой стороны, индивидуальность сигнатур проявляется в количестве и величине парциальных вкладов составляющих, а также в площади, которую охватывает сигнатура. Составляющие и характер их распределения в конфигурации сигнатуры определяют ее площадь, которая может быть представлена как мощность подмножества микросостояний. Поэтому стало очевидным, что выявление и анализ индивидуальных особенностей сигналов функционирования разных подсистем системы «человек-машина» можно осуществить в режиме реального времени с помощью развиваемого сигнатурного подхода. Проявление динамического подобия и упорядоченности в сигнатурах является следствием естественной реакции биосенсоров и сенсоров различной природы. Она направлена на противодействие внешним возмущениям (стимулам) в соответствии с принципом Ле Шателье-Брауна [16]. Поэтому следовало ожидать, что подбор сенсоров с близкими индивидуальными особенностями функционирования всех подсистем позволит повысить эффективность управления СЧМ, а также ее надежность и безопасность. В данной работе представлены результаты дальнейшего развития сигнатурного подхода к обработке и анализу сигналов функционирования всех подсистем системы «человек-машина» в целях обеспечения ее безопасности.

Динамические сигнатуры подсистем СЧМ

Функционирование технических подсистем системы «человек-машина» отображают сигналы совокупности сенсоров физических величин, а функциональное

состояние человека (ФСЧ) – физиологические сигналы (ЭКГ и др.), высокая чувствительность которых к внутренним и внешним факторам делает их своеобразными биосенсорами подсистемы «человек-оператор» [15]. Поэтому основные идеи сигнатурного подхода рассмотрим на примере выявления и сопоставительного анализа индивидуальных особенностей в кардиосигналах $V(t)$ человека и переходном ФО $I(t)$ полупроводникового сенсора излучения.

В основе подхода лежит идея – через преобразование сигнала функционирования в траекторию динамических событий выявить и проанализировать индивидуальные динамические и энергетические особенности сигналов разной природы, которые отображают функционирование всех подсистем. Так, в момент времени t_i мгновенный ФО сенсора как динамическое событие отображается в параметрическом пространстве (состояние – скорость – ускорение) точкой с координатой $(I(t_i), dI(t_i)/dt, d^2I(t_i)/dt^2)$. Поэтому переходной ФО сенсора преобразуется в сложную траекторию динамических событий. Причинно-следственная связь событий между собой формирует геометрически упорядоченные участки траектории, которые отличаются длиной и линейной плотностью динамических событий (см. рис. 2 А). Траектория отображает естественный «сценарий» функционирования сенсора. Это наводит на мысль, что динамическая упорядоченность ФО сенсора скрыта в пространственно-временной корреляции динамических событий не только на самих участках, но и между некоторыми из них. Такие корреляции проявляются в проекциях этой траектории на плоскости (состояние – скорость, состояние – ускорение и скорость – ускорение), которые являются сигнатурами $I(t) - dI/dt$, $I(t) - d^2I/dt^2$ и $dI/dt - d^2I/dt^2$ соответственно [16].

Конфигурации всех сигнатур состоят из геометрически упорядоченных участков, которые отличаются длиной, крутизной или кривизной. Участки отображают составляющие, физический смысл которых определяется размерностью площадей соответствующих сигнатур (действие, энергия и мощность, соответственно). Поэтому конфигурации сигнатур $I(t) - dI/dt$ и $I(t) - d^2I/dt^2$ отображают естественную декомпозицию ФО полупроводникового сенсора на динамические и энергетические составляющие (см. рис. 2 А, плоскости а, b). Подобие асимметричных и симметричных противофазных экстремумов в сигнатуре ФО сенсора $I(t) - d^2I/dt^2$ указывает на одинаковую их природу и взаимосвязь.

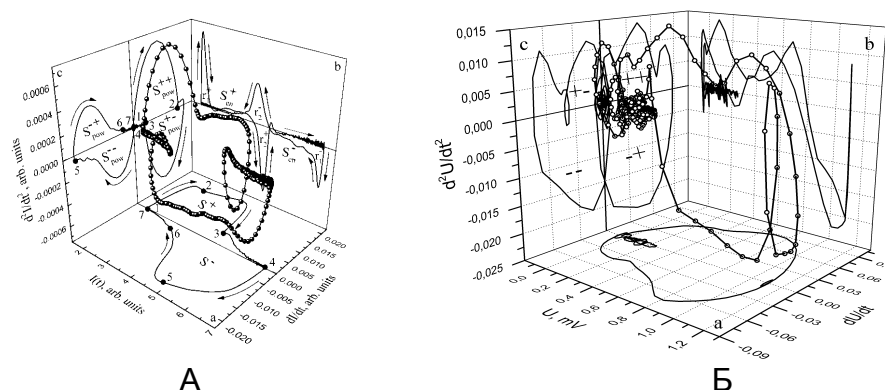


Рис. 1. Фотоотклик сенсора (А) и кардиосигнал (Б) как траектории динамических событий (точки – динамические события) и проекции этих траекторий – соответствующие сигнатуры: а. $-I(t) - dI/dt$; $-V - dV/dt$; б. $-I(t) - d^2I/dt^2$; $V - d^2V/dt^2$; в. $-dI/dt - d^2I/dt^2$; $-dV/dt - d^2V/dt^2$

При этом энергетический баланс составляющих, которые отображают противофазные экстремумы, пропорционален отношению охватываемых площадей, т.е. $V_{ЭН} = S_B/S_H$. Характер взаимосвязи динамических параметров ФО проявляется в сигнатуре $dI/dt - d^2I/dt^2$, конфигурация которой представляет собой параметрический цикл функционирования сенсора. Он расположен в четырех квадрантах плоскости (скорость-ускорение), пространственно разделяющих основные фазы ФО (рис.1, с, квадранты ++, +-, -- и -+). Переход к новой динамической переменной $Y = dI/dt$ преобразовывает сигнатуру 2-го порядка $dI/dt - d^2I/dt^2$ в сигнатуру 1-го порядка $Y - dY/dt$, которая выделяет основные фазы ФО сенсора. Площади, охватываемые сигнатурой в квадрантах, характеризуют мощности основных фаз цикла. Поэтому сигнатура $dI/dt - d^2I/dt^2$ является своеобразным параметрическим портретом ФО сенсора, который отображает естественный цикл функционирования сенсора. Так, симметричность и сбалансированность являются характеристическими признаками устойчивости сенсора как системы. Отношения площадей квадрантов сигнатуры между собой являются показателями сбалансированности мощностей управления $V_{12} = S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{++}$ и т.д. Цикл функционирования описывается матрицей показателей сбалансированности мощностей управления V_{12}, \dots, V_{14} между основными фазами ФО при прямых и обратных переходах (см. таблицу). Анализ этой матрицы позволяет выявить скрытые связи основных фаз функционирования сенсора, а также осуществить динамическую идентификацию и классификацию сенсоров.

Таблица

Матрица показателей сбалансированности мощностей управления V_{12}, \dots, V_{14} между основными фазами ФО при прямых и обратных переходах

Квадранты	“+ +”	“+ -”	“- -”	“- +”
“+ +”	1	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{+-}$	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{--}$	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{-+}$
“+ -”	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{++}$	1	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{--}$	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{-+}$
“- -”	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{++}$	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{+-}$	1	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{-+}$
“- +”	$S_{pow}^{-+} / S_{pow}^{++}$	$S_{pow}^{-+} / S_{pow}^{+-}$	$S_{pow}^{-+} / S_{pow}^{--}$	1

Таким образом, в параметрическом портрете отклика сенсора наиболее полно отображаются индивидуальные особенности динамики его функционирования. Из этого следует, что при подборе сенсоров различной природы для контроля функционирования подсистем СЧМ необходимо руководствоваться подобием их параметрических портретов.

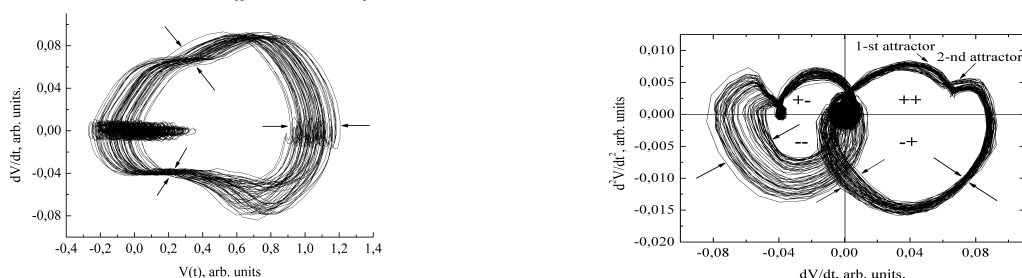
Несмотря на сложность и различия сигналов биосенсоров разной природы, их преобразование в сигнатуры 1-го и 2-го порядков делает все сигналы подобными по форме представления. Это открывает качественно новые возможности для анализа индивидуальных особенностей ФСЧ и оценки его с помощью универсальных дифференциально-геометрических параметров и статистических показателей упорядоченности и сбалансированности. Сигнатуры QRS – комплекса кардиоцикла показаны на рис. 2,б. Новые возможности обусловлены: а) естественной декомпозицией кардиосигнала на динамические и энергетические составляющие,

а также выявлением динамической упорядоченности; б) установлением параметрического цикла функционирования миокарда; в) применением универсальных дифференциально-геометрических параметров составляющих и статистических показателей упорядоченности и сбалансированности разных составляющих; г) преобразованием сигнала в совокупность подмножеств микросостояний.

Скрытые связи между совокупностями динамических событий проявляются в проекции траектории на плоскость (скорость – ускорение), а именно в параметрическом портрете QRS – комплекса (сигнатура $dV/dt - d^2V/dt^2$) [17]. Он является своеобразным циклом функционирования сердечной мышцы (миокарда), который охватывает подмножество микроциклов (см. рис. 2, б, плоскость с). Сигнатура $dV/dt - d^2V/dt^2$ идеального QRS-комплекса имеет форму сердца, а индивидуальные особенности динамики миокарда искажают параметрический портрет. Взаимосвязи между этими особенностями проявляются в показателях сбалансированности мощностей V_{12}, \dots, V_{14} между основными фазами QRS-комплекса. Они, в свою очередь связаны с другими матрицами показателей сбалансированности мощностей, которые определяют из сигнатур $dV/dt - d^2V/dt^2$ других зубцов. Естественно, что после каждого кардиоцикла происходит перестройка взаимосвязей. Поэтому анализ сигнатур кардиоцикла затруднен из-за скрытых связей между его зубцами, которые определяют перестройку сигнатур от цикла к циклу и более информативным становится анализ совокупности кардиоциклов.

Динамическая идентификация переходных функциональных состояний человека-оператора

Представление последовательности кардиоциклов в виде пакетов сигнатур 1-го и 2-го порядков позволило анализировать перестройку их динамики. При этом упорядоченность проявляется не только в каждом кардиоцикле, но и в их последовательности. В них присутствуют характеристические признаки определенного переходного функционального состояния человека-оператора, которые можно качественно и количественно анализировать [15]. Так, анализ более 50 пакетов сигнатур $V(t) - dV/dt$ QRS-комплекса показал, что перестройка конфигурации сопровождается периодическим изменением ее площади и соответственно энтропии H . Все это качественно иллюстрируют пакеты фазовых портретов $V(t) - dV/dt$ QRS-комплекса кардиоциклов человека с ярко выраженными индивидуальными особенностями (рис. 2, а).



а. б.
Рис. 2. Пакеты сигнатур ЭКГ 1-го и 2-го порядка (а, в).

Перестройка в пакете сигнатур 1-го порядка проявляется в следующем: а) характере распределения траекторий в пакете сигнатур (однородный, неоднородный, ступенчатый и др.), б) характере изменения плотности траекторий в основных фазах цикла, в) отношении площадей всех сигнатур зубцов. При этом изме-

нение абсолютного ΔV и относительного $\Delta V / V$ разброса в совокупности циклов имеет диагностическую значимость. Отметим, что анализ последовательности кардиоциклов в виде пакетов их сигнатур 1-го порядка $V(t) - dV/dt$ позволил подтвердить представление о функциональном (биологическом) порядке как двойственном порядке структур и процессов [18].

Индивидуальные особенности перестройки кардиоциклов интегрально проявляются в следующем: а) зависимости энтропии от времени $H(t)$, которая отображает переходы порядок-беспорядок в последовательности сигнатур ЭКГ; б) универсальной функции производства энтропии $dH(t)/dt$, экстремумы которой связаны с функциональными возможностями сердечно-сосудистой системы. С их помощью можно дать количественную оценку различным фазам снижения работоспособности человека-оператора. Зависимости $H(t)$ и $dH(t)/dt$, которые получены с ЭКГ высокого разрешения, можно преобразовать в пакет сигнатур $H(t)-dH(t)/dt$. Анализ перестройки конфигурации сигнатур $H(t)-dH(t)/dt$ и характера изменения ее площади со временем отображает тип динамики перестройки порядок-беспорядок. Она определяет функциональные возможности человека-оператора и важна для прогнозирования функционирования СЧМ в тех или иных условиях.

В последовательности кардиоциклов наиболее информативна перестройка конфигурации и площадей в основных фазах (квадрантах) параметрического портрета $dV/dt - d^2V/dt^2$ QRS-комплекса. Так, при стрессе кардиоцикл становится неустойчивым (аритмия), что порождает двухоборотный цикл (см. рис. 2б). В рамках развиваемого подхода диагностическую значимость имеет также плотность траекторий в квадрантах.

Как видно из рис. 2 в пакетах сигнатур физиологических кардиосигналов характер перестройки порядка-беспорядка проявляется двойственно – динамически (изменяется конфигурация сигнатур) и статистически (изменяется площадь сигнатур в основных фазах кардиоцикла). Именно в характере перестройки фазовых и параметрических портретов всех зубцов кардиоцикла человека качественно и количественно проявляются индивидуальные динамические и энергетические особенности функционирования на ранних стадиях перехода к состояниям переутомления, стресса и др. Поэтому пакеты сигнатур сигналов 1-го и 2-го порядков и средства для их анализа представляют особый интерес для эргономического исследования безопасности систем. Их анализ перспективен для исследования взаимной адаптации подсистем человека между собой и в целом с машиной. Поэтому сигнатурный подход можно применить для согласования динамик совместного функционирования биологических и технических систем. Это представляет практический интерес для разработчиков систем обеспечения безопасности систем человек-машина.

4. Выводы

Представление сигналов функционирования подсистем СЧМ в виде сигнатур 1-го и 2-го порядка позволяет в режиме реального времени осуществлять их динамическую идентификацию. При этом подобие сигнатур сигналов функционирования разных подсистем по форме представления позволяет: а) осуществлять сопоставленный анализ разных по природе сигналов функционирования подсистем СЧМ, б) оптимизировать управление системой; в) обеспечить согласованность функционирования подсистем. Для количественного анализа сигнатур сигналов применены универсальные дифференциально-геометрические параметры и статистические показатели динамической упорядоченности и энергетической сбалансированности их составляющих.

Сопоставительный анализ пакетов сигнатур сигналов функционирования человека (ЭКГ и др.) с типовыми пакетами ФСЧ позволяет идентифицировать различные фазы работоспособности. Анализ пакетов также дает возможность своевременно выявлять переходные состояния (переутомление, стресс и др.) и корректировать управляющие алгоритмы системы. Пакеты сигнатур СЧМ позволяют исследовать процессы взаимной адаптации человека с машиной и средой при различных индивидуальных особенностях работы операторов, уровнях их подготовленности. Представление сигналов функционирования в виде сигнатур упрощает систему отображения информации и повышает эффективность управления. Таким образом, универсальность сигнатурного подхода к обработке сигналов функционирования разных подсистем позволяет анализировать безопасность СЧМ в режиме реального времени и повысить ее надежность.

Список литературы

1. Файнзильберг, Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Л.С. Файнзильберг. –К.: Наукова думка, 2008. – 333с.
2. Мунипов, В. М. Эргономика. / В. М. Мунипов, В. П. Зинченко. –М.: Логос, 2001. –356с.
3. *Cohen A. Biomedical Signals: Origin and Dynamic Characteristic; Frequency-Domain Analysis: The Biomedical Engineering Handbook Editor-in-Chief J.D. Bronzino. – Boca Raton (Florida): CRC and IEEE Press, 1995. –P. 805–827.*
4. Кадомцев, Б. Б. Динамика и информация. / Б. Б. Кадомцев //Успехи физических наук., т. 164, №5, –М. –1994. –с.449-530.
5. Кулаичев, А.П. Компьютерная электрофизиология (в клинической и исследовательской практике). Информатика и компьютеры, / А.П.Кулаичев. –М. Изд-во МГУ, 1999, –с.202.
6. Дремин, И.М. Вейвлеты и их использование /И.М. Дремин, О.В.Иванов, В.А. Нечитайло.//Успехи физических наук. – М., –171,№5.– 2005. –с. 465-501.
7. Рвачев, В.Л., Неклассические методы теории приближений в краевых задачах, /В.А. Рвачев. – К.: «Наукова думка», –1979. –с.194.
8. But, A.V. Photocurrent spectra in parametrical form and their discrete wavelet decomposition for CdZnTe alloys./A.V. But, V. P. Mygal, A. S. Phomin. // Semiconductors, –2009, –Vol. 43, –No. 5, – pp. 581–585.
9. Mygal, V. P. The Multiscale Spectral and Spatial Character of Photoresponse in CdZnTe Crystals. /V. P. Mygal, A. S. Phomin // Technical Physics Letters, –2006, –Vol. 32, No. 6, pp. –484–486.
10. But, A.V. Photoelectric signatures of CdZnTe crystals /A.V. But, V.P. Mygal, A.S. Fomin // Semiconductors, 2009, Vol. 43, No. 9, –pp. 1217–1220.
11. Komar, V.K. Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy./V.K. Komar, V.P. Migal, O.N. Chugai, V.M. Puzikov, D.P. Nalivaiko and N.N.Grebenyuk //Appl. Phys. Letters. – v.81.# 22. – 2002. – pp. 381–386.
12. Сена, Л.А., Единицы физических величин и их размерности. / Л.А Сена, – М.: Наука. –1988. – 336 с.
13. Бартини Р.Л. Некоторые соотношения между физическими величинами./ Р.Л.Бартини.- ДАН СССР, –1965. –№4. – с. 861-864.
14. Спосіб оцінювання електрокардіографічних даних для діагностичних цілей. Ми-

галь В.П., Мигаль Г.В. Пат. №77203 UA, МПК (2006) А61В5/0402. Заявл.17.10.2005; Оpubл. 15.11.2006; Бюл.№11.

15. Мигаль, В.П. Применение параметрических и вейвлет сигнатур для диагностики сенсоров./В.П.Мигаль, И.А.Клименко, Г.В.Мигаль, А.С.Фомин, А.В.Бут //Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – Х: НАУ ХАІ, – 2010. – №4 (45).– С.143–148.

16. Базаров, И. П. Термодинамика. /И. П. Базаров М.: Высш. шк., 1991. – с. 233.

17. Мигаль,В.П., Сигнатури ЕКГ і функціональний стан людини-оператора. В.П.Мигаль, Г.В.Мигаль //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов. – Х.: Нац. аэрокосм. Ун-т «ХАИ», –Х., –2009. – Вып. 44. – С. 219-225.

18. Карери, Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи /Дж.Карери.М.: Мир.1985. –с.228.

Рецензент: Д.т.н., проф., Чугай О. Н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков
Поступила в редакцию 03.09.2014

Сигнатурний підхід до аналізу та забезпечення безпеки системи «людина – машина»

Запропоновано сигнатурний підхід до аналізу і забезпечення безпеки системи «людина-машина». В його основі – динамічна ідентифікація функціонального стану всіх підсистем системи «людина-машина» за допомогою сигнатур сигналів її функціонування. Показано, що подібність за формою подання сигнатур різних за природою сигналів дає можливість в режимі реального часу контролювати функціонування всіх підсистем. Аналіз сигнатур за допомогою універсальних параметрів і показників дозволяє своєчасно виявляти перехідні стани, які зменшують надійність функціонування системи. Для зменшення впливу людського чинника запропоновано засоби аналізу пакетів сигнатур фізіологічних сигналів, в яких індивідуальні особливості перехідних функціональних станів (перевтома, стрес та ін.) людини виявляються на ранніх стадіях.

Ключові слова: безпека системи, перехідні стани, функціональний стан людини-оператора, адаптація, сигнатури, людський чинник.

Signature approach to analysis and safety of the "man - machine" system's

We propose a signature approach to analysis and safety of the "man-machine" system. It is based on the dynamic identification of the functional state of all subsystems of the "man-machine" system with the signatures of signals of its functioning. It is shown that the similarity in shape representation of different signatures on the nature of signals allows for real-time control of the operation of all subsystems. Signature analysis using generic parameters and indicators that allow to identify transition states which reduces the reliability of the system. To reduce the influence of human factor there are proposed analysis tools package signatures of physiological signals where the individual characteristics of transient functional man's states (fatigue, stress, etc.) are displayed in the early stages.

Keywords: system's safety, transition states, the functional state of operator, adaptation, signatures, the human factor.