

ОБЗОРЫ,  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СТАТЬИ

УДК 612.821.6

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ  
БОДРСТВОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА С УЧЕТОМ  
ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРИРОДЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОШИБОК  
ПРИ ЗАСЫПАНИИ**

© 2013 г. В. В. Дементенко, В. Б. Дорохов\*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук,*

*\*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности  
и нейрофизиологии Российской академии наук, Москва,*

*e-mail: valery@dementienko.ru*

Поступила в редакцию 23.04.2012 г.

Принята в печать 19.10.2012 г.

Одной из наиболее частых причин возникновения ошибок при выполнении профессиональной деятельности является критическое снижение уровня бодрствования человека-оператора. Показано, что соотношение между величиной снижения уровня бодрствования и вероятностью ошибок носит нелинейный характер, причем развитие дремотного состояния может по-разному влиять на разные когнитивные функции человека. Это означает, что даже при небольших снижениях уровня бодрствования существует вероятность возникновения ошибок. Для контроля возникновения и предотвращения опасных состояний оператора разрабатываются автоматизированные системы контроля таких состояний (fatigue monitoring devices), но они пока имеют ограниченную область применения и недостаточную эффективность. Предлагается новый подход для количественной оценки эффективности систем контроля функционального состояния человека-оператора с учетом нестабильной природы поведенческих реакций в условиях критического снижения уровня бодрствования.

*Ключевые слова: засыпание, сонливость, состояние нестабильности, переменчивость деятельности, транспортная безопасность, системы контроля уровня бодрствования.*

**Estimation of Efficiency of Fatigue Monitoring Devices Considering the Occurrence  
of the Instability of Nature of Falling Asleep Errors**

**V. V. Dementienko, V. B. Dorokhov**

*Institute of Radio Engineering and Electronics of V.A. Kotelnikova, Russian Academy of Sciences;  
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow,*

*e-mail: valery@dementienko.ru*

One of the most frequent reasons of occurrence of errors at professional work performance is the critical decrease in the level of wakefulness of the operator. It is shown that the parity between the size of the decrease in the level of wakefulness and the probability of errors has a nonlinear character, and development of a drowsy condition can influence differently on various cognitive functions of the person. It means, that even at a small decrease in the level of wakefulness, there is a probability of occurrence of errors. For the control of the occurrence and prevention of dangerous conditions of the operator, the Fatigue monitoring devices are developed, but now they have the limited scope and efficiency. The new approach to a quantitative estimation of the efficiency of the monitoring systems of a functional is offered on condition of the person of the operator taking into account the instability of performance in the conditions of the critical decrease in the level of wakefulness.

*Keywords: falling asleep, sleepiness, state instability, performance variability, transport safety, fatigue monitoring devices.*

DOI: 10.7868/S0044467713010036

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее частых причин возникновения ошибок при осуществлении профессиональной деятельности является критическое снижение уровня бодрствования человека-оператора, вызываемое различными нарушениями ночного сна [8, 11, 27, 30, 31]. Известно, что человеческая деятельность имеет принципиально стохастический, нестабильный характер [16, 21, 22], зависящий как от вариабельности внутреннего состояния человека, так и от изменений во внешней среде. Причем снижение уровня бодрствования может по-разному влиять на разные когнитивные функции человека, связанные с разного рода поведенческими ошибками [25]. Как показывают исследования, снижение уровня бодрствования может вызывать нарушения когнитивной деятельности, сравнимые с действием довольно больших доз алкоголя [32]. Однако если для измерения содержания уровня алкоголя в организме водителя существуют точные и чувствительные приборы, то для измерения уровня сонливости таких приборов пока нет, но такими приборами в будущем могут стать системы автоматического контроля уровня бодрствования.

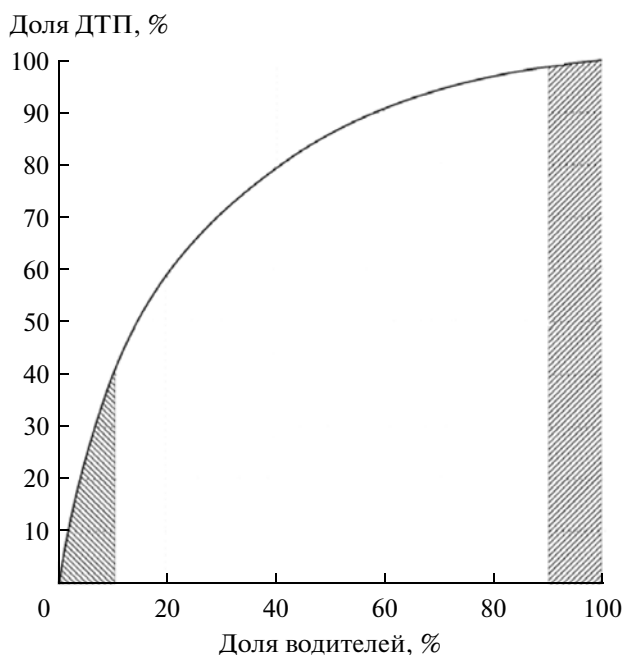
В последнее время большое внимание уделяется разработке технических систем контроля уровня опасных функциональных состояний оператора, объединяемых термином “утомление” (fatigue monitoring devices), направленных на обнаружение и предотвращение таких состояний [12, 13, 18, 26, 32]. В настоящее время существует несколько десятков такого рода систем, основанных на использовании различных физиологических и поведенческих показателей, но они пока имеют ограниченную область применения и недостаточную эффективность [12, 13, 32], связанную с вероятностным характером возникновения поведенческих ошибок при снижении уровня бодрствования [16, 21, 22].

Наш опыт разработки систем контроля уровня бодрствования для железнодорожного и автомобильного транспорта [3–7] позволил нам сформулировать определенные требования к надежности систем контроля уровня бодрствования оператора с гарантированной вероятностью того, что декларируемое неблагоприятное состояние не наступит. Мы полагаем, что для преодоления принципиального физиологического ограничения — нестабильного характера деятельности при сниженном

уровне бодрствования, необходимо периодически активировать (инициировать) оператора в случае сомнения в адекватности его состояния.

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ХАРАКТЕР НАРУШЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ СНИЖЕНИИ УРОВНЯ БОДРСТВОВАНИЯ

Давно известно о вариабельности поведенческих реакций при выполнении непрерывной деятельности, что объяснялось колебанием уровня внимания при бодрствовании [28]. Однако в последние годы в экспериментах с длительным временем бодрствования было показано, что увеличение потребности во сне сопровождается увеличением вариабельности времени выполнения реакции и нестабильности поведенческих реакций [16, 33]. Было показано, что латентность реакции меняется не плавно по мере увеличения длительности бодрствования, а могут неожиданно возникать эпизоды моментального увеличения латентности эффекторной реакции в 2–3 раза, после чего время реакции быстро возвращается к исходным значениям. Полагают, что причиной возникновения таких “провалов” в деятельности длительностью 3–10 с, называемых “микросном”, является экстренное кратковременное включение механизмов сна [14, 29]. Этот феномен моментального (неожиданного) сдвига в характере выполнения реакций, вызываемый увеличением потребности в сне, был сформулирован в виде гипотезы “состояния нестабильности” во внимании [16, 21, 22, 33]. Предполагается, что “состояние нестабильности” в процессах внимания и поведенческих реакций есть результат взаимодействия двух конкурирующих механизмов сна и бодрствования, запускаемых увеличивающейся потребностью в сне (давлением сна) [16, 22, 29, 33]. С одной стороны, происходит экстренное включение механизмов запуска сна и кратковременное внедрение их в процесс бодрствования, что выражается в провалах внимания, задержках или отсутствии реакций на стимулы. С другой стороны, такой экстренный запуск механизмов сна вызывает ответную компенсаторную активацию механизмов бодрствования, направленную на восстановление и поддержание уровня внимания, обеспечивающего эффективность деятельности. Предполагают, что физиологической основой такого



**Рис. 1.** Зависимость количества ДТП от процентной доли водителей, параметр  $\lambda_a$  изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  ч $^{-1}$ . Для первых (худших) 10% водителей —  $\lambda_{a, cp} = 3 \cdot 10^{-4}$  ч $^{-1}$ , для последних (лучших) 10% —  $\lambda_{a, cp} = 7 \cdot 10^{-7}$  ч $^{-1}$ .

**Fig. 1.** Dependence of the quantity of the road accident on a percentage share of drivers, parameter  $\lambda_a$  changes from  $10^{-3}$  till  $10^{-7}$  hour $^{-1}$ . For first 10% of drivers (worst) —  $\lambda_{a, sr} = 3 \cdot 10^{-4}$  hour $^{-1}$ , for last (best) of 10% —  $\lambda_{a, sr} = 7 \cdot 10^{-7}$  hour $^{-1}$ .

конкурентного взаимодействия механизмов бодрствования и сна, вызывающего “состояние неустойчивости”, может быть функционирование гипотетического нейронного переключателя, предложенного К. Сейпер с соавт. [29]. Авторы работ [29, 33] считают, что две популяции нейронов “сна” и “бодрствования”, находящиеся в вентральном латеральном преоптическом ядре гипоталамуса, конкурентно тормозят друг друга и определяют возникновение “состояния неустойчивости” поведенческих реакций при развитии потребности в сне.

Данные такого рода и гипотеза “состояния неустойчивости” внимания лежат в основе разрабатываемого нами подхода к анализу нарушения деятельности при засыпании [3–7]. Ранее нами было экспериментально показано, что соотношение между величиной снижения уровня бодрствования и вероятностью возникновения ошибок деятельности носит нелинейный, вероятностный характер, что было представлено в виде биоматематической модели

засыпания человека-оператора [4]. Наиболее интересным результатом, полученным в этом исследовании, являются данные о возможности появления кратковременных эпизодов “микросна” уже на начальных стадиях засыпания. Этот результат противоречит интуитивным представлениям о постепенном характере перехода ко сну и подтверждает точку зрения, что процесс засыпания носит циклический вероятностный характер, определяемый гетерохронным взаимодействием систем бодрствования и сна [19, 23]. Поэтому при анализе нарушений деятельности следует говорить не о наступлении “момента сна” [20, 27], а более правильно проводить оценку вероятности возникновения эпизодов “микросна” и сопровождающих их ошибок в деятельности [4, 12, 22]. Предполагают, что возникновение дремотного состояния сознания при длительном монотонном вождении по прямой дороге вызывает отсутствие субъективного восприятия водителем опасности своего сниженного уровня бодрствования [9, 20, 24].

Разработанная нами биоматематическая модель засыпания человека-оператора [4], легла в основу наших представлений о необходимости разработки систем контроля уровня бодрствования с учетом вероятностного характера возникновения эпизодов “микросна”.

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ ВОДИТЕЛЕЙ К АВАРИЯМ

В процессе любой трудовой деятельности участвует человек-оператор, но степень его участия может быть различной. В некоторых видах деятельности человек все время непрерывно управляет каким-либо процессом. Примерами могут быть водители транспортных средств, диспетчеры [10]. В других случаях человек вмешивается в процесс управления лишь в аварийных ситуациях.

Ранее нами было показано [3], что всех водителей можно разделить на четыре группы с разной средней интенсивностью потока попадания в ДТП ( $\lambda_{a, cp} = 3.5 - 260 \cdot 10^{-6}$  ч $^{-1}$ ). Интенсивность у худших водителей оказалась в 70 раз больше, чем у лучших. Дополнительная обработка результатов из работ [5, 15] позволила нам получить параметрическую зависимость количества ДТП от процентной доли водителей, их совершающих (рис. 1), где параметром служит  $\lambda_a$  (слева — наихудшие с максимальной величиной  $\lambda_a$ , справа — лучшие

с минимальной  $\lambda_a$ ). Получилось, что очень хорошие водители составляют долю 10% и совершают всего 2% аварий. Но есть водители, которые очень часто попадают в аварии, их доля — около 10%, и они совершают 40% аварий. Если исключить последних из движения или как-то убедить их не садиться за руль, то аварийность упадет почти вдвое. Большинство же водителей — обыкновенные люди и им надо помочь не совершать аварии.

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ БОДРСТВОВАНИЯ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИЕЙ (ИНИЦИАЛИЗАЦИЕЙ)

Признание вероятностной природы возникновения ошибок деятельности привело нас к необходимости включения в систему контроля уровня бодрствования требования о принудительной активации (инициализации) оператора в определенные моменты времени для восстановления его работоспособности.

Рассмотрим принципы построения системы контроля уровня бодрствования с учетом этого требования.

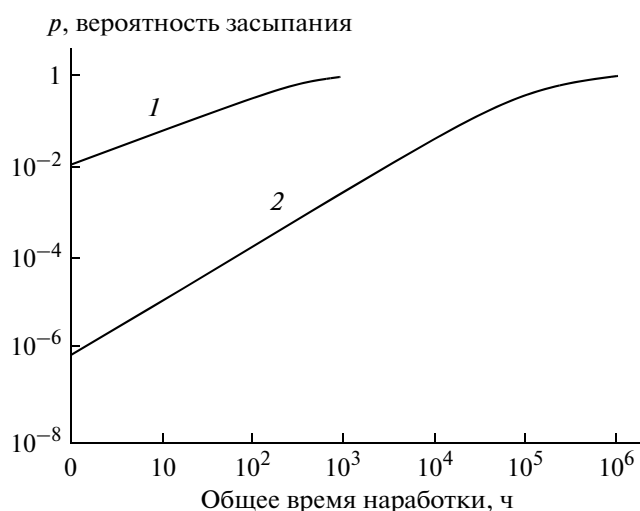
1. Выбор состояний человека, допустимых и недопустимых для выполнения данной работы.

2. Выбор эффективности применения системы (задание вероятности ошибки в определении допустимого состояния).

3. Подбор периодического теста-инициализации (активации) человека с заданной достоверностью.

4. Выбор диагностических показателей (непрерывных и «периодических») для мониторинга состояния с заданной вероятностью ошибки определения *допустимых* состояний оператора.

Первым шагом при построении системы является описание состояний человека, опасных для выполнения данной работы. Очевидно, что таких состояний может быть много, и при создании системы разработчик выбирает наиболее актуальные для заданных условий. Например, для пилота в бою важно определить момент потери сознания или смерти, для гражданского пилота или машиниста поезда, следящих за работой систем автоматического управления, можно ограничиться определением момента засыпания, а для водителя в



**Рис. 2.** Зависимость вероятности засыпания оператора от общего времени наработки. 1 — машинист, 2 — водитель профессионал. По оси ординат — вероятность засыпания, по оси абсцисс — время, ч, логарифмическая шкала.

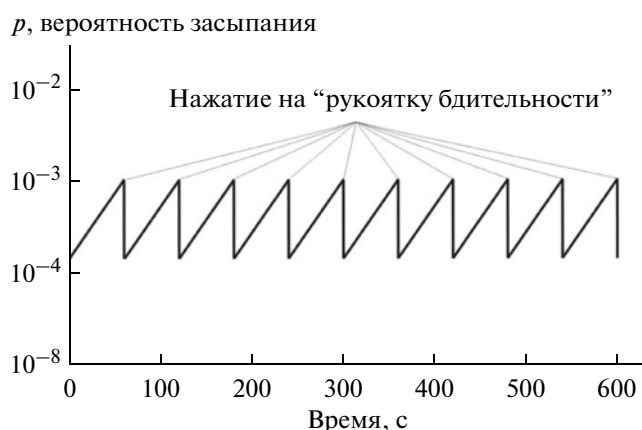
**Fig. 2.** Dependence of the probability of falling asleep the operator from the general time of the operating time. 1 — the machinist, 2 — the professional driver. Ordinate — probability of falling asleep, an abscissa — time in hours, a logarithmic scale.

дальней дороге при монотонной работе гораздо важнее определить наступление состояния глубокой релаксации или, другими словами, низкого уровня бодрствования, который предшествует сну. Пусть в начальный момент времени оператор был надежно инициализирован (активирован), т.е. приведен в заведомо хорошее состояние. Тогда вероятность засыпания ( $p$ ) в условиях монотонной, но важной работы подчиняется закону

$$p = 1 - e^{-\lambda_s t}, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  — интенсивность потока засыпаний и зависит от времени так, как это изображено на рис. 2. Под  $\lambda_s$  — интенсивностью потока засыпаний, понимается среднее число засыпаний водителя в час.  $1/\lambda_s$  приблизительно равно суммарному времени работы всех рассматриваемых водителей, в течение которого произойдет засыпание за рулем одного из них.

Видно, что вероятность чрезвычайно сильно зависит от режима работы человека, управляющего транспортным средством. Эти кривые получены в результате анализа работы машинистов почти за 60 лет, водителей — за 20 лет, а также лабораторных эксперимен-



**Рис. 3.** Зависимость вероятности засыпания оператора от времени работы в режиме инициализации. Изображены 10 мин из 8 ч работы машиниста при наличии «рукоятки бдительности», инициализация каждые 60 с. По оси ординат  $p$  — вероятность засыпания, по оси абсцисс — время, с.

**Fig. 3.** Dependence of the probability of falling asleep the operator from the operating time in an initialization mode. It is shown 10 minutes from 8 work hours of the machinist in the presence of the «vigilance handle», initialization is every 60 seconds. Ordinate —  $p$  — probability of falling asleep, the abscissa — time in seconds.

тов на приблизительно 6 тыс. испытуемых за 16 лет [7]. Надежные статистические данные о работе машинистов и водителей существуют только в ведомствах с высокой дисциплиной, и были доступны очень недолго во время перестройки в России. Понятно, что значения, меньшие  $10^{-5}$  — результат аппроксимации, но даже  $3 \cdot 10^{-4}$  требует минимум 10 тыс. испытаний на человеке. Для водителей-непрофессионалов, которые отправляются в многочасовой путь, график будет лежать между двумя кривыми, изображенными на рис. 2, но для его построения еще нужно набрать дополнительные статистические данные.

Конечно, и смерть, и потеря сознания недопустимы и для водителя. Из мировой статистики [1] следует, что интенсивность потока внезапных смертей составляет  $\lambda_{cf} \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ , что почти в 100 раз меньше, чем средняя интенсивность засыпаний для водителей. Поэтому задача недопущения засыпания, пока она не решена, более актуальна. Иначе говоря, для нас сегодня наиболее интересен случай поддержания достаточного уровня бодрствования, и рассмотрение мы будем проводить для водителя автомобиля, хотя нами использует-

ся аналогичный подход и для других операторских профессий.

На втором шаге задается эффективность применения системы. А именно, во сколько раз вероятность аварии при применении системы поддержания бодрствования водителя за заданный промежуток времени, например за 8 ч работы, будет меньше исходного значения этой вероятности, т.е. без применения такой системы. Значение средней вероятности попадания водителя в ДТП можно получить из анализа аварийности в данной стране, для водителей определенной квалификации и для заданных условий их работы [13], хотя, конечно, можно рассматривать и средние величины для всех водителей в целом. Эффективность применения системы прямо связана с эффективностью поддержания уровня бодрствования водителя и соответственно с вероятностью опасной ошибки методов контроля человека, заложенных в систему. Под опасной ошибкой понимается ситуация, когда система контроля «говорит», что все в порядке, а на самом деле водитель находится уже в опасном для вождения дремотном состоянии. В дальнейшем рассмотрении все вероятности и интенсивности потоков событий будут относиться к опасной ошибке («отказу») метода или прибора, его реализующего.

Все возможные варианты систем «человек-прибор поддержания бодрствования» можно разделить на два принципиально разных типа: системы с инициализацией и системы мониторинга.

В случае реализации системы с инициализацией через определенные промежутки времени, желательно неравные, проводится тестирование, при котором происходит принудительная инициализация и восстановление работоспособности человека. После каждой инициализации оператора его состояние восстанавливается до заданного уровня бодрствования, например до исходного. Вероятность потери работоспособности после инициализации снова начинает нарастать. Этот рост надо прерывать, останавливая его на заданном уровне вероятности, как изображено на рис. 3. К примеру, на железных дорогах ряда стран используется «рукоятка бдительности». Каждые 40–90 с звучит звуковой сигнал, и машинист должен немедленно нажать на определенную кнопку. Время между тестированиями рассчитывается, исходя из заданной вероятности аварии и уровня восстановления бодрствования. Наклонный участок

кривой на рис. 3 — это аппроксимация кривой (1) рис. 2 в диапазоне 0–60 с, так как график (1) на рис. 2 начинается с момента времени 1 ч.

Системы мониторинга измеряют текущее функциональное состояние и по достижении опасного уровня включают необходимые ограничения: автоматическую остановку рабочего процесса, биологическую обратную связь (БОС) и т.п. Например, включение механизма обратной связи относительно “мягко” помогает оператору вернуться в необходимое для выполнения данной работы состояние. В этом случае вероятность потери работоспособности определяется заранее для каждого диагностического показателя, по которому осуществляется мониторинг. Использование систем такого типа уменьшает  $\lambda$ , по сравнению с вариантом без контроля оператора, но возрастание вероятности наступления неблагоприятного состояния с ростом времени работы подчиняется закону, соответствующему приведенному выше выражению (1).

Можно было бы рассматривать еще один тип прибора поддержания бодрствования: системы мониторинга по результатам управления объектом. Например, слежение за траекторией движения автомобиля. Однако такие системы фактически могут рассматриваться как системы второго типа, в которых текущее функциональное состояние измеряется опосредованно.

При использовании систем первого типа можно теоретически достичь любого сколь угодно высокого уровня бодрствования водителя, но из-за постоянного отвлечения водителя на тестирование вероятность аварии может даже возрасти. Кроме того, частые проверки очень быстро приводят водителя в состояние стресса.

Из-за недостатков, которые присущи обоим типам систем, мы пошли по пути разработки комбинированных систем. Т.е. мы считаем, что наиболее эффективными являются системы с непрерывным мониторингом, биологической обратной связью и инициализацией при достижении критических (пороговых) состояний. В этом случае необходим выбор тестов водителя, составление реестра показателей для мониторинга и способов представления водителю информации о его состоянии при использовании БОС.

Однако в любом случае, какую бы вероятность мы не задавали, система, контролирующая оператора, будет беспокоить его проверками (инициализациями). Это “расплата” за то, что мы даем гарантированную вероятность того, что декларируемое неблагоприятное состояние не наступит. Иначе говоря, в случае сомнения в благоприятном состоянии водителя система “человек-прибор поддержания бодрствования” инициализируется.

Итак, третий шаг при разработке системы — это принятие надежного “теста инициализации”. В рассматриваемом нами случае уровень бодрствования считается достаточным, если водитель правильно прошел тест. Таким тестом может быть нажатие на “кнопку бдительности”, расположенную в неудобном месте (вероятность ошибки  $p \sim 10^{-4}$ ) или ответ на вопрос о показаниях каких-либо приборов автомобиля ( $p \sim 10^{-4}$ ) и т.п. При этом очень важно знать, как меняется со временем вероятность наступления опасного состояния после успешно пройденного теста, какова достоверность самого теста в момент его проведения и каков уровень восстановления бодрствования.

Уровень восстановления водителя при инициализации определяется теми мероприятиями, которые его активируют. Например, если при тестировании он должен поднять руку, то вероятность невосстановления нормального состояния  $p \sim 10^{-2}–10^{-3}$ , если плюс к этому нужно изменить положение тела, то  $p \sim 10^{-3}–10^{-4}$ , а если дополнительно брызнуть водой в лицо, то, по-видимому,  $p < 10^{-4}$  и т.п.

Четвертый шаг — это выбор диагностических показателей, которые могут отменить очередное тестирование. Для этого нужно иметь реестр физиологических показателей, по которым можно определить, что данное опасное состояние не наступило. Другими словами, инициализация водителя может быть отодвинута до наступления такого состояния. Но надо знать надежность этого показателя.

Вероятность ошибки ( $p$ ) в определении засыпания по выбранному показателю должна быть в любой момент времени меньше, чем та, которая задана для системы в целом, и в частности для вероятности наступления опасного состояния после успешно пройденного теста.

Реестр таких показателей составлен, и время от времени в него добавляются новые параметры. Однако главная проблема состоит не в описании всех этих показателей, а в их верификации. Необходимо проведение испытаний

Сравнение технологий мониторинга водителей транспортных средств  
Comparison of the technologies of the monitoring of drivers of vehicles

| Технология                              | $\lambda_s, \text{ч}^{-1}$ | $q, \text{ч}^{-1}$ |
|---|----------------------------|--------------------|
| Изменение “почерка” вождения            | 0.3                        | 5                  |
| Рациональные действия                   | 0.3                        | 5                  |
| Пульс                                   | 0.3                        | 7                  |
| Речь                                    | 0.2                        | 5                  |
| Поза (тонус мышц)                       | 0.2                        | 5                  |
| Направление взгляда                     | 0.2                        | 3                  |
| Наклоны головы (тонус мышц)             | 0.1                        | 2                  |
| Моргания                                | 0.05                       | 3                  |
| Окулограмма                             | 0.05                       | 2                  |
| ЭДА (47 млн. человеко-часов без аварий) | 0.0001                     | 1                  |
| Микросаккады (потенциально)             | ~0.001                     | —                  |

*Примечание.*  $\lambda_s$  – интенсивность опасных отказов данной технологии, реализованной в виде макета или промышленного образца,  $q$  – среднее количество тревог за час работы водителя при использовании этих приборов.

на сотнях и тысячах испытуемых, чтобы достоверно определить вероятности ошибок при использовании того или иного параметра. Только после этого показатель может быть введен в систему предотвращения наступления определенного состояния с заданной величиной вероятности опасного отказа.

На сегодня известен ряд физиологических параметров, которые могут служить диагностическими показателями в системах второго типа. К ним относятся особенности речевых фонем в слове “понял”, которое используется в диалоге военных, определенные особенности электродермальной активности (ЭДА), движения век и глаз, изменения сердечной деятельности, электрическая активность мозга и т.п. [12, 13, 18, 26, 31]. Но из них по надежности, как нам известно, верифицированы только два: особенности фонем, вероятность ошибки диагностики опасного состояния  $p = 10^{-4}$  [2], и электродермальная активность, интенсивность потока опасных отказов  $\lambda_s = 10^{-4} \text{ч}^{-1}$  [2].

К настоящему времени нами проведены лабораторные испытания [2], в которых при использовании автомобильного и локомотивного симуляторов исследовались возможности диагностики с помощью различных технологий. Для этого создавались действующие макеты, реализующие определенную техноло-

гию мониторинга водителя (машиниста) с критериями и порогами, выработанными нами на основании собственных экспериментов по разработке технологий и данных литературы [9]. Значения для ЭДА, фазическая компонента которой использовалась в качестве диагностического показателя [17], получены при использовании как лабораторных данных, так и после анализа результатов эксплуатации приборов (47 млн. человеко-часов), основанных на этой технологии на железных дорогах России [6]. Параметры для речи получены при одном запросе за 3 мин. Результаты, полученные нами при лабораторных испытаниях макетов и подконтрольной эксплуатации серийных приборов, приведены в таблице.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна предлагаемого подхода заключается в учете принципиальной нестабильности поведенческих реакций в условиях критического снижения уровня бодрствования, обусловленной сложностью нейробиологических процессов перехода от бодрствования ко сну [16, 20–24]. Мы утверждаем, что единственный способ повысить надежность систем контроля уровня бодрствования оператора и обеспечить гарантированную вероятность то-

го, что декларируемое неблагоприятное состояние не наступит, — это активировать (иницировать) оператора в случае сомнения в адекватности состояния водителя. Достоверность будет определяться самым слабым звеном — тем показателем, вероятность ошибки при использовании которого наибольшая. Поэтому необходимо выбирать параметры мониторинга, тест инициализации, технический механизм реализации биологической обратной связи таким образом, чтобы вероятности опасной ошибки каждой из используемых технологий были приблизительно равны. В противном случае, за превышение точности придется нести необоснованные дополнительные затраты.

Авторы выражают благодарность за помощь в работе над данной статьей С.В. Геруса (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-07-00812а) и Российского гуманитарного научного фонда (проект № 12-06-00927а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихерт А.М., Лаун Б. Внезапная смерть. М.: Медицина, 1982. 304 с.
2. Дементиев В.В. Физические принципы построения систем безопасного мониторинга состояния человека-оператора: Автореф. дис.... докт. техн. наук. М., 2010. 337 с.
3. Дементиев В.В., Герус С.В. Статистический анализ предрасположенности водителей к авариям. Нелинейный мир. 2010. 8(4): 255–263.
4. Дементиев В.В., Дорохов В.Б., Герус С.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Биоматематическая модель засыпания человека-оператора. Физиология человека. 2008. 34(5): 63–72.
5. Дементиев В.В., Карагодин Л.В., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Телеметрическая система контроля бодрствования машиниста локомотива. Патент на изобретение № 2376159 от 03 декабря 2008 г.
6. Дементиев В.В., Марков А.Г., Фомин Д.Г., Шахнарович В.М. Телеметрическая система контроля бодрствования водителя транспортного средства. Патент на изобретение N2282543 от 18 февраля 2005 г.
7. Дементиев В.В., Марков А.Г., Коренева Л.Г., Шахнарович В.М. Автоматизированный контроль бодрствования водителя транспортного средства. Биомед. электроника. 2001. 29 (1): 157–171.
8. Дорожно-транспортные происшествия в России (2010 г.). Обобщенные сведения. М.: НИЦ ГИБДД МВД России, 2011. 26 с.
9. Дорохов В.Б., Дементиев В.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Электродермальные показатели субъективного восприятия ошибок в деятельности при наступлении дремотного состояния. Журн. высш. нерв. деят. 2000. 50(2): 206–218.
10. Душков Б.А., Королев А.В., Смирнов Б.А. Психология труда, управления, инженерная психология и эргономика. Энциклопедический словарь. Академический проект, Фонд “Мир”, 2005. 848 с.
11. Кукуев Н.С., Маркина Н.Е., Строчков С.А., Яхонтов В.В. Анализ состояния безопасности движения в локомотивном хозяйстве железных дорог России за 1995 год. Железнодорожный транспорт. Обзорная информация. Сер. Безопасность движения. Вып. 1–3. М., 1996: 1–79.
12. Balkin T.J., Horrey W.J., Graeber R.C., Czeisler C.A., Dinges D.F. The challenges and opportunities of technological approaches to fatigue management. *Accid. Anal. Prev.* 2011. 43: 565–572.
13. Barr L., Howarth H., Popkin S., Carroll R.J., Volpe J.A. A review and evaluation of emerging driver fatigue detection measures and technologies. *Proceedings from the International Conference on Fatigue Management in Transportation.* Seattle, USA. 2005: 1–27.
14. Boyle L.N., Tippin J., Paul A., Rizzo M. Driver performance in the moments surrounding a microsleep. *Transp. Res. Part F. Traffic Psychol. Behav.* 2008. 11 (2): 126–136.
15. Campbell B.J., Levine D. Accident proneness and driver license programs. *First International Conference on Driver Behavior.* Zurich. Switzerland. 1973. PS 3: 1.
16. Doran S.M., Van Dongen H.P.A., Dinges D.F. Sustained attention performance during sleep deprivation: evidence of state instability. *Arch. Ital. Biol.* 2001. 139: 253–267.
17. Dorokhov V.B., Dementienko V.V., Koreneva L.G., Markov A.G., Shakhnarovich V.M. Hypothesis about the nature of elektrodermal reactions. *Int. J. Psychophysiol.* 1998. 30 (1–2): 267.
18. Driver vigilance devices: systems review. London: Railway Safety. 2002. 105 с.
19. Evans B.M. Cyclical activity in non-rapid eye movement sleep: a proposed arousal inhibitory mechanism. *EEG. a. Clin. Neurophysiol.* 1993. 86: 123–131.
20. Foulkes D., Vogel G. Mental activity at sleep onset. *J. Abnorm. Psychol.* 1965. 70: 231–243.
21. Goel N., Rao H., Durmer J.S., Dinges D.F. Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Semin. Neurol.* 2009. 29: 320–339.
22. Gunzelmann G., Gross J.B., Gluck K.A., Dinges D.F. Sleep deprivation and sustained attention performance: integrating mathematical and cognitive modeling. *Cogn. Sci.* 2009. 33(5): 880–910.
23. Hobson J.A., Pace-Schott E., Stickgold R. Dreaming and the brain: toward a cognitive neuroscience of conscious states. *Behav. Brain Scis.* 2000, 23(6): 793–842.
24. Horne J.A., Baulk S.D. Awareness of sleepiness when driving. *Psychophysiology.* 2004. 41(1): 161–165.



25. *May J.F.* Driver Fatigue. Handbook of Traffic Psychology. Amsterdam: Elsevier. 2011: 287–297.
26. *McDonald J., Patel D., Belenky G.* Sleep and performance monitoring in the workplace: The basis for fatigue risk management. Principles and Practice of Sleep Medicine, 5th Edition. Philadelphia: Elsevier Saunders. 2010: 775–783.
27. *Ogilvie R.D.* The process of falling asleep. Sleep Med. Rev. 2001. 5(3): 247–270.
28. *Oken B.S., Salinsky M.C., Elsas S.M.* Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. Clin. Neurophysiol. 2006. 117(9): 1885–1901.
29. *Saper C.B., Fuller P.M., Pedersen N.P., Lu J., Scammell T.E.* Sleep state switching. Neuron. 2010. 68(6): 1023–1042.
30. *Van Dongen H.P.A., Hursh S.R.* Fatigue, performance, errors, and accidents. Principles and Practice of Sleep Medicine, 5th Edition. Philadelphia: Elsevier Saunders. 2010: 753–760.
31. *Williamson A., Chamberlain T.* Review of on-road driver fatigue monitoring devices. Technical Report, NSW Injury Risk Management Research Centre, University of New South Wales. 2005: 1–6.
32. *Williamson A.M., Feyer A.M., Mattick R.P., Friswell R., Finlay-Brown S.* Developing measures of fatigue using an alcohol comparison to validate the effects of fatigue on performance. Accid. Anal. Prev. 2001. 33(3): 313–326.
33. *Zhou X., Ferguson S.A., Matthews R.W., Sargent C., Darwent D., Kennaway D.J., Roach G.D.* Dynamics of neurobehavioral performance variability under forced desynchrony: evidence of state instability. Sleep. 2011. 34(1): 57–63.