

Комплексный анализ физиологических параметров работников с целью классификации их физического состояния

А. Н. Михайлов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
lexarobotr2d2@gmail.com

М. К. Беккер
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
bekkerm@gmail.com

П. А. Пузыня
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
vok-02@mail.ru

Н. М. Шкода
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
nik.shkoda.2003@mail.ru

Аннотация. Данная работа представляет собой описание алгоритмов, позволяющих оценить состояние работников в начале и в процессе рабочего дня для принятия решения об их допуске к продолжению работы. Система, для которой предлагается использовать данные алгоритмы, включает в себя два этапа сбора физиологических параметров: первичная станция (перед началом рабочего дня у каждого работника проверяется артериальное давление, уровень алкоголя в крови и температура тела) и автономный монитор (работники носят его в течение дня, монитор обеспечивает сбор следующих параметров: оксигенацию крови, частоту сердечных сокращений, данные с акселерометра и гироскопа). Работа включает в себя построение математической модели, экспертной системы, а также разработку алгоритмов, предусмотренных для использования в автономной микроконтроллерной системе. Работа выполнена при поддержке АО «РОСГАЗИФИКАЦИЯ».

Ключевые слова: ФПГ, ЧСС, оксигенация, сатурация, температура, акселерометр, гироскоп, экспертная система

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой на современных производствах является участие в тяжёлой физической (а порой и опасной) деятельности работников предприятий, находящихся в болезненном или угрожающем их жизни состоянии. Причин у этого может быть множество – некорректная оценка здоровья перед выходом на работу, смущение или чувство долга перед коллегами, желание выйти сверхурочно за дополнительную плату и так далее. Вне зависимости от причин такого поведения, в интересах предприятия всегда является наиболее скорое выявление таких прецедентов и их пресечение. Подобная халатность или невнимательность со стороны работников может не только снизить производственные мощности, но также грозит повреждением или выходом из строя дорогостоящего оборудования, травмированием себя и коллег вплоть до существенного вреда здоровью. Конечно, это далеко не обязательное следствие в каждом подобном прецеденте, однако на длительной дистанции без должного контроля вероятность такого исхода значительно возрастает.[1]

Смежной с описанной проблемой является ещё одна, не менее актуальная – внезапное ухудшение состояния

прямо в процессе работы. Даже если в начале рабочего дня сотрудник казался абсолютно здоровым и готовым к тяжёлому физическому труду, то может случиться так, что его состояние может резко ухудшиться в процессе рабочей смены. Причин у таких внезапных «ударов» тоже может быть несколько – хронические заболевания (например, сердечно-сосудистой системы), преклонный возраст работника, внезапное происшествие на предприятии и так далее. Такие ситуации в равной степени необходимо максимально оперативно отслеживать и принимать меры, так как в противном случае последствия могут быть полностью аналогичны предыдущему пункту.[1]

Для решения данной проблемы была предложена система классификации физического состояния работников перед началом рабочего дня с целью отказа в допуске к работе, совмещенная с системой тревог, призванной отслеживать ухудшение физического состояния работников в процессе их деятельности. В данной работе описана структура использования данной системы, описана работа с параметрами и программное обеспечение, обеспечивающее работу системы.

II. СТРУКТУРА АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

A. Основные компоненты

Для решения двух поставленных проблем предлагается использовать два зависимых модуля, связанных между собой общей системой хранения и обработки данных. Данное разбиение позволит разделить набор необходимых физиологических параметров и универсализировать систему.

Первым модулем данной системы является Первичная Станция (ПС) – модуль, устанавливаемый на проходной предприятия или в любом другом месте, через которое сотрудники попадают на место работы. Задачей данного модуля является анализ физиологических параметров работников для определения состояния их здоровья на момент начала рабочего дня. Данная система должна выдавать один из трёх возможных результатов – Красный (сотрудник не допущен в этот день к работе на предприятии), Жёлтый (допуск сотрудника к работе определяется руководством или дежурным специалистом) и Зелёный (сотрудник допущен к работе).

Вторым модулем является носимое устройство, Монитор Рабочего (МР). Данный модуль надевается каждым работником и в обязательном порядке носится в течение всего рабочего дня. Задачей данного модуля является анализ физиологических параметров работника с целью выявления экстренного ухудшения состояния здоровья, чтобы в дальнейшем немедленно просигнализировать руководству или дежурному специалисту.

В. Выбор физиологических параметров

При выборе анализируемых физиологических параметров необходимо руководствоваться их информативностью для классификации физического состояния работников. Важно отметить, что для ПС и МР набор параметров будет отличаться. Это обусловлено и разными физическими возможностями, и разными задачами – не все параметры могут резко измениться в течение рабочего дня и нет смысла их регулярно мониторить. Были выявлены следующие полезные параметры:

Для модуля ПС: уровень алкоголя в выдыхаемом воздухе, артериальное давление (АД), температура тела. [1,2,3]

Для модуля МР: частота сердечных сокращений (ЧСС), оксигенация крови (уровень SpO2), оценка физической активности по данным акселерометра и гироскопа. [1, 4, 5]

С. Структурная схема работы модулей системы

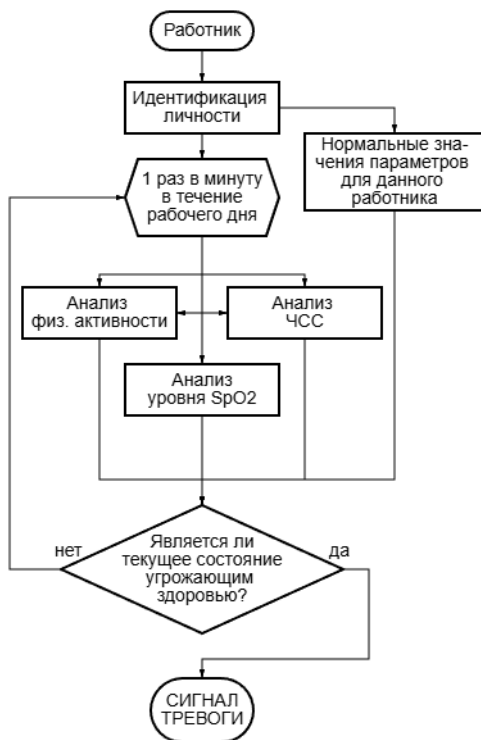


Рис. 1. Структурная схема анализа МР

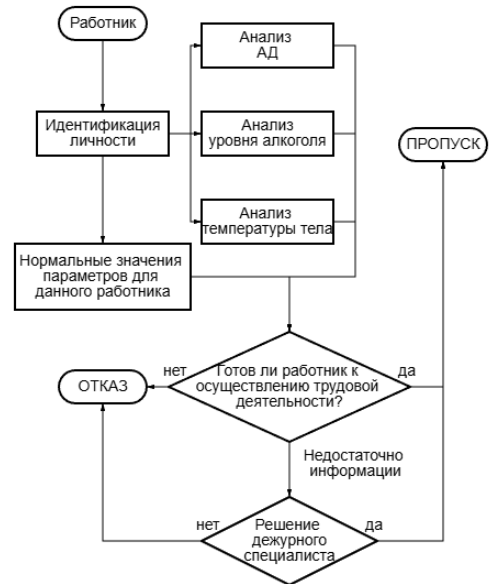


Рис. 2. Структурная схема анализа ПС.

На рисунках 1 и 2 приведены структурные схемы работы обоих модулей. Далее будет подробно рассмотрен порядок работы каждого из них.

III. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МОДУЛЕ ПС

А. Представление физиологических параметров

Набор параметров, подверженных анализу представляет собой следующую структуру:

- Артериальное давление. Систолическое (САД) и диастолическое (ДАД) артериальные давления – два целочисленных значения от 0 до 255 мм.рт.ст..
- Концентрация алкоголя (этанола) в выдыхаемом воздухе – целое число, мг/л * 10^{-2}
- Температура тела – целое число, $^{\circ}\text{C} * 10^{-2}$

В. Определение нормальных и критических значений

Стоит заметить, что все нижеперечисленные метрики будут дополняться с каждым новым измерением на конкретном человеке. Значения нормы подразумевают коэффициент возможной вариабельности и погрешности, что позволит повысить чувствительность оценки. Также все приведённые ниже значения сравниваются друг с другом с учётом погрешности прибора или датчика, осуществляющих измерение. Данная величина может варьироваться в зависимости от конкретной реализации устройства, поэтому не рассматривается в данной работе. [3]

Оценка отклонений АД представляет собой оценку отклонений от СКО уже известных как норма значений для каждого из работников. Ниже будет приведён пример для САД, для ДАД картина будет аналогичной (только со своими допустимыми значениями):

$$T1_{\sigma} = 2\sigma([SYS_{norm}]) \quad T2_{\sigma} = 3\sigma([SYS_{norm}])$$

$$\Delta SYS = |SYS - mean([SYS_{norm}])|.$$

где $[SYS_{norm}]$ – набор всех известных нормальных значений САД для данного работника (дополняются

после каждого измерения, классифицированного дежурным как допустимое), $T1_s$ – верхняя граница допустимого отклонения, $T2_s$ – нижняя граница критического отклонения. Таким образом АД будет считаться допустимым при следующем условии:

$$\Delta SYS \leq T1_s,$$

и будет считаться недопустимым при условии:

$$\Delta SYS \geq T2_s,$$

а во всех остальных случаях конечное решение должно быть принято дежурным специалистом. [3]

Уровень этанола в выдыхаемом воздухе и температура тела гораздо меньше зависят от индивидуальных особенностей человека и гораздо больше имеют общие закономерности в классификации. Это не означает, что нормальные значения для человека будут игнорироваться, однако эта тема требует отдельного исследования и не актуальна на данный момент.

Для уровня этанола в выдыхаемом воздухе за верхнюю допустимую границу будет приниматься значение, установленное статьёй 12.8 КоАП РФ, и равное 0,16 мг/л. Выбор данного значения обусловлен схожей целью и методом диагностики, а также степенью ответственности перед жизнью и здоровьем своей и коллег. За нижний уровень критической границы будет приниматься в 3 раза большее значение, соответствующее степени лёгкого опьянения и равное 0,48 мг/л. [2]

Для температуры тела принимаются следующие границы: верхний допустимый уровень равный 37°C, а нижний критический уровень равный 38°C. Выбор данных параметров основан на ряде приведённых исследований. [4]

Ниже представлена таблица, в которой сведены все подобранные граничные значения для каждого измеряемого параметра.

ТАБЛИЦА I. ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ НА ПС

Граница	Δ САД, мм.рт.ст.	Δ ДАД, мм.рт.ст.	Ур. этанола, мг/л	Температ ура, °С
T1	$2\sigma((SYS_{norm}))$	$2\sigma((DYA_{norm}))$	0,16	37,0
T2	$3\sigma((SYS_{norm}))$	$3\sigma((DYA_{norm}))$	0,48	38,0

C. Классификация физического состояния работника

Решение о допуске работника к работе принимается в том случае, если значения всех контролируемых параметров находятся в пределах допустимых отклонений от индивидуальной нормы. Такая ситуация интерпретируется как соответствие физиологического состояния работника его обычному функциональному уровню, не создающему повышенных рисков при выполнении производственных задач.

Отказ в допуске к работе формируется при выявлении критических отклонений хотя бы по одному из контролируемых параметров. В этом случае система фиксирует неблагоприятное физиологическое состояние работника и автоматически выдает решение о недопуске к работе.

Помимо двух однозначных решений предусматривается промежуточная категория – неопределённая ситуация. Она возникает в случаях, когда один или несколько параметров находятся в пограничной зоне между нормальными и критическими значениями. Такие отклонения не позволяют автоматически сделать достоверный вывод о работоспособности человека, однако могут свидетельствовать о временных физиологических изменениях, погрешностях измерения или индивидуальных особенностях организма. В подобных ситуациях окончательное решение принимается дежурным ответственным сотрудником на основании дополнительного осмотра, повторного измерения параметров или анализа сопутствующей информации о состоянии работника.

IV. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МОДУЛЕ МР

Монитор рабочего фиксируется на каждом сотруднике в начале рабочего дня и анализирует физическое состояние работников в течение дня с целью сигнализации в случае экстренной ситуации.

A. Представление физиологических параметров

Набор параметров, подверженных анализу представляет собой следующую структуру:

- Оксигенация крови, уровень SpO2, % * 10^{-2}
- Частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин
- Класс физической активности, один из вариантов – ходьба, стоячее/лежащее/сидячее положения, бег

B. Определение порогов критических значений для подачи сигнала тревоги

Аналогично модулю ПС, в анализе параметров в МР учитываются обычные для человека параметры. При этом в данном случае это будет учитываться не только для физиологических параметров (SpO2 и ЧСС), но и для физической активности, ведь для сотрудника, работающего за компьютером (или станком) и для грузчика это будут принципиально разные значения. Так же стоит отметить, что в данном случае имеет место корреляционный анализ ЧСС и класса активности, так как зачастую это взаимосвязанные параметры, что будет рассмотрено далее.

Для SpO2 уровнем тревоги будем считать уровень меньший либо равный 97%. Данное значение выбрано на основе приведённых исследований. [4]

Для ЧСС будем различать отклонения от нормы вниз и вверх. При отклонении от нормы вниз ниже критического уровня (уровень взят по аналогии с АД и равен $2\sigma((ЧСС_{norm}))$) сигнал тревоги должен поступать сразу же. Это обусловлено тем, что в повседневных рабочих условиях ЧСС не может без причины понижаться от стандартных значений – такое поведение может свидетельствовать не только о предобморочном или обморочном состоянии работника, но и так же о его сонливости или сне на рабочем месте. Данные состояния так же важно классифицировать при формировании тревог. [3]

При подъёме ЧСС вверх выше допустимого уровня появляется необходимость в сопоставлении его значения

и значения класса физической активности за данный интервал. Такое разделение вводится, так как ЧСС имеет свойство расти не только при патологическом состоянии здоровья, но и при совершении физического труда. Таким образом рост ЧСС вверх во время ходьбы или бега будет оцениваться как нормальное состояние, а рост ЧСС при сидячем/лежащем состоянии будет являться поводом для подачи сигнала тревоги.

С. Классификация положения тела по сигналу акселерометра и гироскопа:

Алгоритм классификации положения и активности человека основан на анализе сигналов трёхосевого акселерометра и трёхосевого гироскопа, регистрируемых с частотой 50 Гц на запястье человека. Входные данные представляют собой временные ряды ускорений $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ и угловых скоростей $g_x(t), g_y(t), g_z(t)$, содержащие 3000 отсчётов на каждую ось за одну минуту наблюдения. [5]

Предварительно исходные сигналы разбиваются на окна фиксированной длины. В соответствии с распространённой практикой обработки акселерометрических сигналов используется окно длиной примерно 5 секунд с перекрытием 50%. Такой подход позволяет выделять циклические компоненты движений человека и повышает устойчивость классификации. Для минутного интервала формируется последовательность окон, для каждого из которых вычисляется набор признаков.

Для каждого окна вычисляются следующие статистические и спектральные признаки: Среднее значение ускорения по каждой оси: $\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_x(i)$, где $N = 256$ – размер окна (при 50 Гц для заданной длины окна); Стандартное отклонение ускорения:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_x(i) - \mu_x)^2};$$

Энергия сигнала в частотной области. Для каждого окна вычисляется дискретное преобразование Фурье, после чего определяется энергия: $E_x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X_k|^2$, где X_k – коэффициенты БПФ. Этот показатель характеризует периодичность движения и помогает различать циклические активности, такие как ходьба и бег. [5]

На основе рассчитанных параметров осуществляется дальнейшая классификация:

Активность классифицируется как статическое положение, если выполнены оба условия:

$$\sigma_{acc} < 0,5 \frac{M}{c^2} \quad \sigma_{gyro} < 0,04 \frac{рад}{c}$$

где $\sigma_{acc} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ (аналогично для гироскопа). Низкая вариабельность ускорения и угловой скорости характерна для отсутствия движения. [5]

Если интервал не проходит по критерию статического положения, то дальше идёт различие на два оставшихся возможных класса. Также дополнительно определяются ещё две величины: результирующее ускорение $a_{rslt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)}$ и энергия всего сигнала $E = E_x + E_y + E_z$. [5]

Ходьба классифицируется при выполнении следующих условий:

$$0,5 < \sigma_{acc} < 3,5 \frac{M}{c^2} \quad 10 < \sigma_{rslt} < 15 \frac{M}{c^2} \quad E < 3.$$

Бег классифицируется при выполнении следующих условий:

$$\sigma_{acc} \geq 3,5 \frac{M}{c^2} \quad \sigma_{rslt} \geq 15 \frac{M}{c^2} \quad E \geq 3$$

В случае если не все пункты выполняются для одного из этих типов, то используется оценка ошибки от нужных границ для выбора одного из двух типов. После классификации каждого окна определяется итоговая активность за минутный интервал. Для этого применяется правило большинства. Если более 60 % окон классифицированы как один и тот же тип активности, то данный класс принимается как результат для всей минуты наблюдения. В противном случае активность помечается как неопределённая. Результаты точности классификатора физической активности приведены в таблице ниже.

ТАБЛИЦА II. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМА.

Тип активности	Acc, %	Sp, %	Pr, %
Статическое положение	96	94	97
Ходьба	93	91	95
Бег	95	92	98

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы были разработаны структурные схемы экспериментов, подобраны необходимые для анализа параметры, а также разработаны алгоритмы для их оценки. В дальнейшем предстоит проверить алгоритмы на практике на базе предприятия АО «РОСГАЗОФИКАЦИЯ», а также провести исследование на тему влияния нормальных значений тех или иных параметров на оценку состояния здоровья и готовности к работе у сотрудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Доклад о правоприменительной практике контрольной (надзорной) деятельности в области промышленной безопасности за 2024 год / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. — М., 2025. — URL: <https://www.gosnadzor.ru> (дата обращения: 10.03.2026)
- [2] Баринская Т.О., Смирнов А.В., Саломатин Е.М., Шаев А.И. Соотношения концентрации этанола в выдыхаемом воздухе и крови после однократного приема алкоголя // Наркология. 2008. Т. 7, № 1 (73). С. 33–40.
- [3] Парфенов В.А., Парфенов А.В. Современные представления о вариабельности артериального давления // Артериальная гипертензия. 2010. Т. 16, № 4. С. 345–354.
- [4] Иванов К.П. Новые данные о кровообращении и процессе оксигенации крови в лёгких в их физиологическом состоянии // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2012. Т. 154, № 10. С. 402–405.
- [5] Ravi N., Dandekar N., Mysore P., Littman M. Activity recognition from accelerometer data / Proceedings of the Seventeenth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence, 2005. Pittsburgh, 2005. pp. 1541–1546.