

The background of the book cover is a detailed illustration. At the top, a large, close-up profile of a man's face with dark hair and a serious expression is shown, looking downwards. The background behind him is a deep space scene with stars, a crescent moon, and a bright sun or star on the right. In the upper left, a futuristic spacecraft is visible. The lower half of the cover depicts a rugged, rocky landscape under a bright sun. In the foreground, various electronic components are scattered on the ground, including a digital display showing '105', a camera lens, a circuit board, and other small electronic parts. A small, transparent dome structure is visible on the right side of the foreground.

СТОЯН ТАНЕВ

**СЕНЗОРИ И АПАРАТНИ СИСТЕМИ
ЗА ОЦЕНКА НА ФИЗИОЛОГИЧНОТО
И ПСИХОФИЗИОЛОГИЧНОТО
СЪСТОЯНИЕ НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР
В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ**

Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“

Стоян Танев

**СЕНЗОРИ И АПАРАТНИ СИСТЕМИ
ЗА ОЦЕНКА НА ФИЗИОЛОГИЧНОТО
И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНОТО СЪСТОЯНИЕ
НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР
В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ**



Монографията представя цялостен интердисциплинарен подход към изследването, измерването и анализа на функционалното състояние на човека в условия на повишено натоварване, с акцент върху космическите полети.

Разгледана са основните физиологични и психо-физиологични ефекти на микрогравитацията, когнитивния стрес и адаптационните механизми, както и изискванията към надежден мониторинг на човека оператор като елемент от системата „човек машина“.

В монографията са систематизирани ключови показатели за оценка на състоянието – кардиоваскуларни, дихателни, неврофизиологични и интегрални психо-физиологични индекси, които позволяват обективна оценка на работоспособността и адаптационния капацитет. Специално внимание е отделено на биомедицинските сензори, техните принципи на действие, класификация и ограничения, както и на изискванията към тяхната работа в екстремни среди, включително микрогравитация, радиация и температурни вариации.

Представени са архитектурите на апаратни системи за сбор и обработка на данни, методи за мултисензорна интеграция, алгоритми за анализ в реално време и адаптивни модели за персонализирана оценка. Значителен принос представлява описанието на разработени български системи като ССОД „Зора“, NEUROLAB-B, BeON-1 и специализирани решения за дълговременен мониторинг и работа в подводни и хипербарни условия.

Монографията завършва с разглеждане на интегрирани приложения, методични подходи и перспективи за развитие на интелигентни системи за мониторинг, насочени към повишаване на безопасността, ефективността и надеждността на човека оператор в космически, авиационни и други екстремни среди.

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ

Стоян Танев

СЕНЗОРИ И АПАРАТНИ СИСТЕМИ
ЗА ОЦЕНКА НА ФИЗИОЛОГИЧНОТО
И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНОТО СЪСТОЯНИЕ
НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР
В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ

София • 2026



Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“

Рецензенти:

Проф. д-н Гаро Мардиросян
Проф. д-р Павел Пенев

© Стоян Колев Танев, автор, 2026

© Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“, 2026

Институт за космически изследвания и технологии – БАН
ISBN 978-619-7490-25-1

Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“
ISBN 978-619-245-635-1

СЪДЪРЖАНИЕ

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ.....	7
ВЪВЕДЕНИЕ	9

ГЛАВА 1. ЧОВЕКЪТ ОПЕРАТОР В УСЛОВИЯТА НА КОСМИЧЕСКИ ПОЛЕТ / 11

1.1. Понятието „човек оператор“ – инженерно и медицинско тълкуване	11
1.2. Физиологични ефекти на микрогравитацията	12
1.3. Психо-физиологични натоварвания и когнитивен стрес.....	12
1.4. Адаптационни механизми и индивидуални различия	13
1.5. Изисквания към мониторинга на състоянието на човека оператор	14

ГЛАВА 2. ФИЗИОЛОГИЧНИ И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ / 15

2.1. Общи принципи при избора на показатели	15
2.2. Кардиоваскуларни показатели	16
2.3. Дихателни параметри и оксигенация	16
2.4. Неврофизиологични показатели	17
2.5. Психо-физиологични и интегрални показатели.....	18

ГЛАВА 3.
СЕНЗОРИ ЗА МОНИТОРИНГ / 21

3.1. Биомедицински сензори – класификация и принципи на действие	21
3.2. Контактни и безконтактни технологии	32
3.3. Изисквания към сензорите за космически приложения	33
3.4. Надеждност, калибриране и устойчивост в екстремни условия ..	35
3.5. Ограничения и източници на грешки.....	37

ГЛАВА 4.
АПАРАТНИ СИСТЕМИ / 44

4.1. Архитектура	44
4.2. Сензорна интеграция и синхронизация на данните	54
4.3. Аналогово-цифрово преобразуване и предварителна обработка	59
4.4. Софтуерни средства за анализ и визуализация	67
4.5. Адаптивни и персонализирани модели	70
4.6. Системи за работа в реално време	73

ГЛАВА 5.
АПАРАТУРИ / 76

5.1. ССОД „Зора“	76
5.2. Невролаб-Б	82
5.3. ВеON-1	94
5.4. Холтери ER02, MA1	118
5.5. DBML	139

ГЛАВА 6.
ПРИЛОЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВИ / 144

6.1. Космическа медицина	145
6.2. Методични подходи	161
6.3. Тенденции и перспективи за развитие	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	175
ЛИТЕРАТУРА	179

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ

ADC	Analog-to-Digital Converter (аналогово-цифров преобразувател)
BeON-1	Интегрирана апаратурна система за психо-физиологичен мониторинг
CMRR	Common Mode Rejection Ratio (коефициент на потискане на синфазния сигнал)
CO ₂	Въглероден диоксид
DAC	Danish Aerospace Company
DARA	Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten
DBM	Водолазен биомедицински монитор
DBML	Водолазен биомедицински монитор за хипербарни условия
DBM-SAN	Водолазна мултисензорна система за физиологичен мониторинг
DBM-WATCH	Носим сензор часовник в състава на DBM
EDA	Electrodermal Activity (електродермална активност, кожно-гальванична)
EEG (ЕЕГ)	Електроенцефалография
EKG (ЕКГ)	Електрокардиография
EMG (ЕМГ)	Електромиография
ER02M	ЕКГ recorder ЕКГ Холтер система за 24-часов непрекъснат запис
ESD	Electrostatic Discharge (електростатичен разряд)
HRV	Heart Rate Variability (вариабилност на сърдечната честота)
ИКИТ	Институт за космически изследвания и технологии
БАН	Българска академия на науките
ИМБП	Институт медико-биологических проблем
РАН	Институт медико-биологических проблем – Российская академия наук
MA-01	Monitoring of abnormalities Холтер система за сънна апнея
MAR-2	Mucules activity recorder – преносима електромиографска система

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (микроелектромеханични системи)
NEUROLAB-B	Интегрирана експериментална платформа за психо- физиологичен мониторинг Невролаб – Б (Б означава България)
NTC	Negative Temperature Coefficient (термистор с отрицателен температурен коефициент)
O ₂	Кислород
pH	Водороден показател (киселинност)
PPG	Photoplethysmography (фотоплетизмография)
RMS	Root Mean Square (ефективна стойност)
SEE	Single Event Effects (единични радиационни събития)
SpO ₂	Peripheral Capillary Oxygen Saturation (периферна кислородна сатурация)
ССОД	Система за сбор и обработка на данни
TID	Total Ionizing Dose (обща йонизираща доза)

ВЪВЕДЕНИЕ

Изследването на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор в условията на космически полет представлява ключова област в съвременната космическа медицина и инженерни науки. Високите изисквания към безопасността, ефективността и устойчивостта на човека оператор налагат разработването на специализирани сензори и апаратурни системи, способни да предоставят надеждни данни за динамиката на жизнените функции, когнитивните процеси и адаптационните механизми в екстремни условия.

Основната цел на настоящата монография е да систематизира знанията и инженерния опит, натрупан при проектирането, разработката и експлоатацията на сензорни и апаратурни системи за оценка на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор, с акцент върху българските разработки, включително ССОД „Зора“ и NEUROLAB-B, BeON-1, Апаратура за билатерална стимулация и лечение на посттравматичен стрес, холтери за непрекъснати дълговременни записи на ЕКГ, насищане на кръвта с кислород, анализ на апнеата по време на сън, както и монитори в реално време за следене на физиологичните показатели на водолази под вода и хипербарни камери.

Монографията представя концептуалните принципи, архитектурните решения и методичните подходи, които позволяват съчетаване на надеждност, прецизност и функционална ориентация към човека.

Въведение в темата включва разглеждане на следните основни аспекти:

Научна и практическа значимост – необходимостта от обективна оценка на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор в условията на микрогравитация, повишено информационно натоварване и психологически стрес.

Историческа перспектива – еволюция на българските системи за сбор и обработка на данни, от ССОД „Зора“, NEUROLAB-B, BeON-1 до DBM, и тяхната роля в развитието на космическата авиационна и морска медицина, и създадената инженерна школа.

Технически и методичен контекст – описание на принципите на сензорната интеграция, архитектурата на апаратурните системи и разработените експериментални протоколи, позволяващи прецизна оценка на физиологичните и психофизиологичните показатели.

Области на приложение – освен космическата сфера, приложенията на системите включват авиация, подводни операции, оператори на сложни технически системи и други екстремни среди, където човешкият фактор е критичен.

Тази монография има за цел не само да документира конкретни инженерни и научни разработки, но и да предостави концептуална рамка за бъдещи системи за мониторинг и оценка на човека оператор в екстремни условия. По този начин тя свързва инженерното проектиране, методичния подход и научното изследване в една интегрирана дисциплина, осигурявайки база за иновации и развитие на нови технологии за космически и други екстремни приложения.

ГЛАВА 1

ЧОВЕКЪТ ОПЕРАТОР В УСЛОВИЯТА НА КОСМИЧЕСКИ ПОЛЕТ

1.1. Понятието „човек оператор“ – инженерно и медицинско тълкуване

Понятието „човек оператор“ заема централно място в изследванията на системите „човек – машина“, особено в контекста на космическите полети, авиацията и други екстремни среди (Warm, Parasuraman and Matthews, 2008). В инженерния смисъл човекът оператор се разглежда като активен елемент на сложна техническа система, който възприема информация от средата, обработва я на когнитивно ниво и реализира управляващи действия чрез моторни реакции. Надеждността и ефективността на системата зависят пряко от неговите психо-физиологични характеристики и функционално състояние (Wickens et al., 2015).

От медицинска гледна точка човекът оператор представлява биологична система с ограничени адаптационни ресурси, подложена на комплексни физични, физиологични и психологически натоварвания. В условията на космически полет тези натоварвания включват микрогравитация, радиационно въздействие, сензорна депривация или претоварване, нарушени циркадни ритми и продължителен психоемоционален стрес (Nicogossian et al., 2016). Тези фактори могат да доведат до изменения във функциите на сърдечно-съдовата, дихателната, нервната и мускулната система, както и до промени в когнитивните процеси.

Съвременното разбиране за човека оператор интегрира инженерния и медицинския подход, като го разглежда като компонент на кибернетична система с обратна връзка. В този контекст мониторингът на физиологичното и психо-физиологичното състояние се явява ключов елемент за адаптивно управление и предотвратяване на критични състояния по време на мисията (Buckey, 2006).

1.2. Физиологични ефекти на микрогравитацията

Микрогравитацията е един от основните специфични фактори на космическия полет, който оказва съществено влияние върху физиологичните системи на човека оператор. Липсата на гравитационно натоварване води до преразпределение на телесните течности, промени в хемодинамиката и адаптация на сърдечно-съдовата система (Convertino, 1996). Наблюдава се централизация на кръвообращението, увеличено венозно връщане и изменения в сърдечната честота и нейната вариабилност.

Дихателната система също претърпява адаптационни промени, свързани с променена механика на дишането и регулация на газообмена. Макар белодробната функция да се запазва относително стабилна, кислородната сатурация и контролът на дишането могат да бъдат повлияни от намалената физическа активност и съпътстващите стресови фактори (Prisk, 2014).

Особено значими са измененията в мускулно-скелетната система. Отсъствието на механично натоварване води до мускулна атрофия, намаляване на мускулната сила и загуба на костна минерална плътност, като скоростта на тези процеси зависи от продължителността на полета и индивидуалните характеристики на оператора (Fitts et al., 2010).

Нервната система реагира чрез промени в сензорната интеграция, вестибуларната функция и моторния контрол. Нарушенията в пространствената ориентация и координацията са най-изразени в началната фаза на полета и изискват специализирани адаптационни стратегии (Clément and Reschke, 2010).

Тези ефекти подчертават необходимостта от непрекъснат мониторинг на физиологичните показатели чрез надеждни сензорни системи.

1.3. Психо-физиологични натоварвания и когнитивен стрес

Психо-физиологичните натоварвания в условията на космически полет представляват комплекс от фактори, които оказват директно въздействие върху когнитивните функции, емоционалното състояние и поведенческите реакции на човека оператор.

Операторът е подложен на продължителна изолация, ограничено пространство и висока отговорност при управление на сложни системи (Kanas and Manzey, 2008).

Когнитивният стрес се проявява чрез нарушения във вниманието, работната памет, скоростта на обработка на информацията и изпълнителните функции. Повишеното информационно натоварване и необходимостта от вземане на решения в условия на ограничено време могат да доведат до когнитивна умора и повишен риск от операторски грешки (Parasuraman and Rizzo, 2007). Нарушените циркадни ритми допълнително усилват тези ефекти (Flynn-Evans et al., 2016).

Психоемоционалният компонент включва стрес, тревожност и промени в настроението, свързани с изолацията и продължителното пребиваване в контролирана среда. Тези състояния често се съпровождат от изменения в автономната нервна регулация, измерими чрез показатели като сърдечна честота, вариабилност на сърдечния ритъм и електродермална активност (Healey and Picard, 2005).

1.4. Адаптационни механизми и индивидуални различия

Адаптацията на човека оператор към условията на космически полет представлява динамичен процес, включващ физиологични, психофизиологични и поведенчески механизми. Целта на тези механизми е поддържане на функционална стабилност при продължително въздействие на неблагоприятни фактори (Palinkas, 2001).

Физиологичната адаптация включва пренастройване на автономната регулация, хормоналния баланс и метаболитните процеси. Характерът и скоростта на тези промени са силно индивидуални и зависят от физическата подготовка, здравословното състояние и генетичните особености на оператора (Buckey, 2006).

Психо-физиологичната адаптация се изразява в развитие на ефективни стратегии за управление на вниманието, когнитивното натоварване и емоционалния стрес. Индивидуалните различия в устойчивостта към стрес налагат персонализиран подход при оценката и интерпретацията на измерваните показатели (Matthews et al., 2014).

1.5. Изисквания към мониторинга на състоянието на човека оператор

Мониторингът на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор в условията на космически полет поставя високи изисквания към сензорните и апаратурните системи. Те трябва да осигуряват непрекъснато, надеждно и неинвазивно измерване на ключови показатели, без да нарушават работния процес (Liao et al., 2012).

Сензорите трябва да притежават висока чувствителност, дългосрочна стабилност и устойчивост на външни въздействия като температурни вариации, вибрации и електромагнитни смущения. Критично значение има точността и възпроизводимостта на измерванията при продължителна експлоатация (Di Rienzo et al., 2013).

Апаратурните системи следва да осигуряват интеграция на многоканални физиологични данни и тяхната обработка в реално време чрез адаптивни алгоритми за оценка на състоянието и ранна детекция на критични изменения. Подобен подход повишава безопасността на мисията и ефективността на човека оператор (Parasuraman, Sheridan and Wickens, 2008).

ГЛАВА 2

ФИЗИОЛОГИЧНИ И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ ЗА ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР

2.1. Общи принципи при избора на показатели

Оценката на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор в условията на космически полет изисква използването на обективни, надеждни и информативни показатели, които отразяват функционалното състояние на основните регулаторни системи на организма. Изборът на подходящи показатели се определя от спецификата на екстремната среда, от характера на изпълняваните задачи и от необходимостта за ранно откриване на неблагоприятни изменения в състоянието на оператора.

Основен принцип при подбора на физиологични показатели е тяхната чувствителност към натоварване и стрес, както и възможността за непрекъснато или дълговременно измерване. Показателите трябва да позволяват оценка както на текущото функционално състояние, така и на динамиката на адаптационните процеси във времето (Nicogossian *et al.*, 2016). Особено важно е те да бъдат относително независими от волеви контрол и да отразяват реалното физиологично състояние на организма.

Психо-физиологичните показатели представляват интеграция между физиологичните сигнали и когнитивните процеси. Те позволяват обективна оценка на нивото на умора, внимание, стрес и психоемоционално напрежение, които имат пряко отношение към надеждността на човека оператор, като елемент от системата „човек машина“ (Warm, Parasuraman and Matthews, 2008).

В контекста на космическите полети особено значение има възможността за комбиниране на различни показатели в интегрални индекси, които отразяват общото функционално състояние на оператора и позволяват автоматизирана оценка и прогнозиране на рискови състояния (Buckey, 2006).

2.2. Кардиоваскуларни показатели

Кардиоваскуларната система е една от най-чувствителните към натоварване и стрес физиологични системи, което я прави ключов обект на мониторинг в условията на космически полет. Показателите, свързани със сърдечната дейност и кръвообращението, предоставят ценна информация за автономната регулация, адаптационните резерви и нивото на психофизиологично напрежение.

Електрокардиограмата (ЕКГ) представлява основен метод за оценка на електрическата активност на сърцето и позволява анализ на сърдечния ритъм, проводимостта и наличието на аритмии. В условията на микрогравитация се наблюдават промени в сърдечната честота и в нейната вариабилност, които отразяват адаптацията на автономната нервна система към променените хемодинамични условия (Convertino, 1996).

Вариабилността на сърдечната честота (HRV) се утвърждава като чувствителен индикатор за баланса между симпатиковата и парасимпатиковата регулация. Намалването на HRV често се асоциира с повишено ниво на стрес, умора и намалени адаптационни възможности на организма (Shaffer and Ginsberg, 2017). В космическата медицина HRV се използва както за оценка на текущото състояние, така и за проследяване на дългосрочни адаптационни процеси.

Кръвното налягане и неговата динамика също предоставят важна информация за сърдечно-съдовата регулация. Макар измерването му в условията на микрогравитация да е технически предизвикателство, развитието на неинвазивни методи и апаратурни решения позволява включването му в комплексния мониторинг на човека оператор (Buckey, 2006).

2.3. Дихателни показатели и оксигенация

Дихателната система играе съществена роля в поддържането на кислородния баланс и енергийния метаболизъм на организма, особено в условията на продължително натоварване и стрес. Показателите, свързани с дишането, са важен компонент от

системите за мониторинг на физиологичното състояние на човека оператор.

Честотата и ритъмът на дишане предоставят информация за регулаторните механизми на дихателния център и за нивото на психоемоционално напрежение. Промените в дихателния модел често съпътстват състояния на стрес, тревожност и когнитивно натоварване (Grossman and Taylor, 2007).

Насищането на кръвта с кислород (SpO_2), измервано чрез пулсоксиметрия, е широко използван показател за оценка на ефективността на газообмена. В условията на космически полет мониторингът на SpO_2 позволява своевременно откриване на нарушения в дихателната функция и адаптацията към специфичната среда на кораба или станцията.

Комбинираният анализ на дихателните и кардиоваскуларните показатели дава възможност за по-точна оценка на функционалното състояние и за идентифициране на ранни признаци на претоварване или дезадаптация.

2.4. Неврофизиологични показатели

Неврофизиологичните показатели заемат централно място в оценката на психо-физиологичното състояние на човека оператор, тъй като отразяват пряко функционирането на централната и периферна нервна система. Те са особено важни при анализ на когнитивните процеси, вниманието, умората и сензомоторната координация.

Електроенцефалографията (ЕЕГ) предоставя информация за биоелектричната активност на мозъка и позволява оценка на нивото на бодърстване, когнитивното натоварване и психоемоционалното състояние.

Промените в спектралния състав на ЕЕГ сигналите, като съотношението между различните честотни ленти, са широко използвани за оценка на умора и намалена бдителност (Klimesch, 1999).

Електромиографията (ЕМГ) и миографските методи позволяват оценка на мускулната активност, умората и координацията на движенията. В условията на микрогравитация тези показатели са от особено значение за проследяване на

измененията в мускулната функция и за оценка на ефективността на контрамерките срещу мускулната атрофия (Fitts *et al.*, 2010).

2.5. Психо-физиологични и интегрални показатели

Психо-физиологичните показатели представляват интегрална категория измерими параметри, която обединява обективни физиологични сигнали с когнитивни, емоционални и поведенчески характеристики на човека оператор. За разлика от чисто физиологичните измервания, които отразяват функционирането на отделни системи (кардиоваскуларна, дихателна, мускулна и др.), психо-физиологичните индикатори предоставят информация за взаимодействието между централната нервна система, автономната регулация и текущите когнитивни процеси. По този начин те позволяват оценка не само на биологичното състояние, но и на функционалната готовност за изпълнение на сложни задачи в динамична и високорискова среда.

Особено място сред психо-физиологичните показатели заемат маркерите на автономната нервна активност, които отразяват баланса между симпатиковия и парасимпатиковия дял на вегетативната регулация. Електродермалната активност (EDA), вариабилността на сърдечната честота (HRV), периферната вазомоторна реакция и дихателните параметри са чувствителни към изменения в емоционалното състояние, когнитивното натоварване и нивото на стрес. Електродермалната активност, в частност, се разглежда като надежден индикатор за симпатикова активация, тъй като промените в кожната проводимост са пряко свързани с активността на екриновите потни жлези, инервирани от симпатиковата нервна система. Този показател реагира както на остри стресови стимули, така и на продължително когнитивно напрежение, което го прави особено ценен при мониторинг на оператори в екстремни условия.

Вариабилността на сърдечната честота допълва тази информация чрез количествена оценка на автономния баланс и адаптационния капацитет на организма. Намалената HRV често се асоциира с повишено натоварване, хроничен стрес и намалена регулаторна гъвкавост, докато адекватната вариабилност е индикатор за добра адаптация и функционална устойчивост.

Комбинираният анализ на EDA и HRV позволява по-прецизна интерпретация на психо-физиологичното състояние, като намалява вероятността от погрешни заключения, основани на единичен показател.

Интегралните показатели и индекси представляват следваща стъпка в анализа на функционалното състояние. Те се формират чрез комбиниране на множество физиологични и психо-физиологични параметри в единна оценъчна метрика, която отразява общото ниво на натоварване, адаптация или риск. Подобни индекси могат да включват нормализирани стойности на HRV, амплитуда и честота на електродермалните реакции, електроенцефалографски характеристики, мускулна активност и показатели за двигателна вариабилност. Чрез математически модели, мултисензорно сливане и статистически или машинно-обучаващи алгоритми се генерира обобщен показател, позволяващ автоматизирана класификация на състояния като нормална функционалност, повишено когнитивно натоварване, умора или риск от дезадаптация (Warm, Parasuraman and Matthews, 2008).

Предимството на интегралните индекси се състои в тяхната способност да отразяват комплексния характер на човешката реакция към стресори и оперативни изисквания. В условията на космически полет, където физиологичните изменения са съчетани с изолация, ограничени ресурси и висока отговорност, единичните показатели често не са достатъчни за надеждна оценка. Интегралният подход позволява ранно откриване на латентни тенденции към функционална декомпенсация, преди да се проявят клинично значими симптоми или поведенчески грешки.

Разработването и валидирането на такива показатели изисква строго методологично основание. Необходимо е определяне на индивидуални базови нива, анализ на чувствителността и специфичността на индекса, както и оценка на неговата надеждност при продължителен мониторинг. Особено значение има екологичната валидност – способността на индекса да предсказва реалното изпълнение и безопасността в оперативна среда. Валидирането следва да се осъществява чрез съпоставка с обективни показатели за работоспособност, когнитивни тестове и експертна оценка.

В контекста на съвременните апаратурни системи за мониторинг интегралните показатели създават основа за внедряване на интелигентни алгоритми за поддръжка на решенията. Те могат да служат като входен параметър за адаптивна автоматизация, динамично разпределение на задачите и персонализирани препоръки към оператора. В бъдещите космически мисии, характеризиращи се с продължителна автономност и ограничена външна подкрепа, подобни системи ще бъдат не просто диагностичен инструмент, а активен компонент на управлението на риска и поддържането на оптимална работоспособност на екипажа.

По този начин психо-физиологичните и интегралните показатели се утвърждават като ключов елемент в концепцията за интелигентен, персонализиран и автономен мониторинг на човека оператор, насочен към повишаване на безопасността, надеждността и устойчивостта на дейността в екстремни среди.

ГЛАВА 3

СЕНЗОРИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ФИЗИОЛОГИЧНИ И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНИ ПАРАМЕТРИ

3.1. Биомедицински сензори – класификация и принципи на действие

Сензорите за физиологичен и психо-физиологичен мониторинг представляват основата на всяка система за оценка на състоянието на човека оператор. Те позволяват непрекъснато измерване на жизнените показатели и осигуряват данни за динамиката на адаптационните процеси, когнитивното натоварване и стресовите реакции (Di Rienzo *et al.*, 2013).

В условията на космически полет сензорите трябва да отговарят на специфични изисквания, включително:

- устойчивост на микрогравитация, вибрации и температурни колебания;
- минимално енергопотребление и маса;
- неинвазивност и удобство при дълготрайно носене;
- възможност за интеграция в мултисензорни апаратурни системи (Nicogossian *et al.*, 2016).

Интеграцията на данни от различни сензори позволява създаване на комплексни показатели и индекси, които обединяват физиологични, психо-физиологични и поведенчески параметри за оценка на общото функционално състояние на оператора (Warm, Parasuraman and Matthews, 2008).

Биомедицинските сензори представляват технически средства за преобразуване на физиологични, биофизични и биохимични сигнали в електрически величини, подходящи за последваща обработка, анализ и интерпретация. Те изпълняват ролята на интерфейс между живата биологична тъкан и електронните измервателни системи, като основно изискване е минимално въздействие върху изследвания физиологичен процес (Webster, 2010; Khandpur, 2014).

Биомедицинските сензори могат да бъдат класифицирани според няколко основни критерия:

Според измервания параметър:

- електрофизиологични (електрокардиография – ЕКГ, електроенцефалография – ЕЕГ, електромиография – ЕМГ);
- механични (налягане, сила, ускорение);
- оптични (кръвна оксигенация, кръвен поток);
- термични (телесна температура);
- химични и биохимични (рН, газов състав, метаболити).

Според принципа на преобразуване:

- резистивни;
- капацитивни;
- пиезоелектрични;
- оптоелектронни;
- електрохимични (Pallàs-Areny & Webster, 2001).

Според начина на взаимодействие с организма:

- инвазивни;
- минимално инвазивни;
- неинвазивни.

3.1.1. Електрофизиологични сензори

Електрофизиологичните сензори регистрират електрическата активност, генерирана от възбудими тъкани – сърце, мозък и скелетни мускули. Тези сигнали се характеризират с ниска амплитуда и висока чувствителност към електромагнитни смущения (Malmivuo & Plonsey, 1995).

а) Електрокардиографски (ЕКГ) сензори

ЕКГ сензорите измерват разликата в електричния потенциал, възникваща в резултат на деполяризацията и реполяризацията на миокарда. Измерваният сигнал може да се представи като:

$$V_{ECG}(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) \quad (3.1)$$

Където, $\phi_1(t)$ и $\phi_2(t)$ са електричните потенциали, измерени върху повърхността на тялото.

Електродно-кожният контакт се моделира чрез еквивалентен импеданс:

$$Z_{skin} = R_e + \frac{1}{j\omega C_e} \quad (3.2)$$

където R_e е контактното съпротивление, а C_e – капацитетът на двойния електричен слой (Webster, 2010).

б) Електроенцефалографски (ЕЕГ) сензори

ЕЕГ сензорите регистрират сумарната електрическа активност на кортикалните неврони, основно пирамидалните клетки. Амплитудата на сигнала е в диапазона 10–100 μV , което налага използването на усилватели с висок коефициент на усилване и нисък собствен шум (Sörnmo & Laguna, 2005).

Сигналят може да бъде описан като:

$$V_{EEG}(t) = \sum_{i=1}^N k_i I_i(t) \quad (3.3)$$

където $I_i(t)$ представлява йонният ток на i -тия неврон, а k_i – коефициент на пространствено затихване (Malmivuo & Plonsey, 1995).

в) Електромиографски (ЕМГ) сензори

ЕМГ сензорите измерват електричната активност на мускулните влакна и са широко използвани за оценка на мускулна активация и умора. Често използван параметър е ефективната (RMS) стойност на сигнала:

$$EMG_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3.4)$$

където T е продължителността на времевия прозорец а $v^2(t)$ – квадрат на регистрирания сигнал за времеви интервал dt .

Този показател е пропорционален на броя активирани моторни единици и тяхната честота на възбуждане (De Luca, 1997; Merletti & Parker, 2004).

3.1.2. Механични биомедицински сензори (налягане, сила, ускорение)

Механичните биомедицински сензори регистрират механични величини, породени от физиологични процеси, като кръвно налягане, мускулна сила, движение и вибрации на тялото. Те преобразуват механичната деформация или ускорение в електрически сигнал чрез различни физични ефекти.

а) Сензори за налягане

Сензорите за налягане често се реализират като пиезорезистивни или капацитивни структури. При пиезорезистивните сензори промяната в налягането води до механична деформация на мембрана и съответна промяна на електрическото съпротивление:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (3.5)$$

където:

- k – коефициент на тензочувствителност;
- ε – относителна деформация.

При капацитивните сензори налягането изменя разстоянието между електродите:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (3.6)$$

където d е функция на приложеното налягане. Тези сензори се използват широко за измерване на артериално и вътречерепно налягане.

б) Сензори за сила и деформация

Сензорите за сила обикновено използват тензометрични мостови схеми (Wheatstone bridge). Изходното напрежение на моста е:

$$V_{out} = V_{exc} \cdot \frac{\Delta R}{4R} \quad (3.7)$$

където V_{exc} е захранващото напрежение.

Те намират приложение при динамометрия и анализ на мускулната функция.

в) Сензори за ускорение

Биомедицинските акселерометри, най-често MEMS (micro electro mechanical systems) тип, измерват инерционните сили:

$$F = m \cdot a \quad (3.8)$$

където ускорението a се определя чрез отклонението на микромеханична маса. Те се използват за анализ на походка, тремор, постурална стабилност и физическа активност.

3.1.3. Оптични биомедицински сензори (кръвна оксигенация, кръвен поток)

Оптичните сензори използват взаимодействието между светлинно излъчване и биологични тъкани за извличане на физиологична информация. Те са неинвазивни и подходящи за дългосрочен мониторинг.

а) Сензори за кръвна оксигенация (SpO_2)

Измерването на кислородната сатурация се базира на различната спектрална абсорбция на оксигемоглобин и дезоксигемоглобин. Законът на Beer–Lambert се прилага за две дължини на вълната:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-[\epsilon_{HbO_2}(\lambda)c_{HbO_2} + \epsilon_{Hb}(\lambda)c_{Hb}]l} \quad (3.9)$$

Отношението на абсорбциите се използва за изчисляване на сатурацията:

$$SpO_2 = \frac{c_{HbO_2}}{c_{HbO_2} + c_{Hb}} \quad (3.10)$$

б) Сензори за кръвен поток (Laser Doppler)

Тези сензори използват Доплеровото отместване на светлината, разсеяна от движещи се еритроцити:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (3.11)$$

където v е скоростта на кръвния поток. λ – дължина на вълната [m], θ – ъгъл между посоката на движение и посоката на разпространение на вълната. Методът позволява оценка на микроциркулацията.

3.1.4. Термични биомедицински сензори (телесна температура)

Термичните сензори измерват температурата като индикатор за метаболитна активност, възпалителни процеси и терморегулация.

а) Контактни температурни сензори

Най-често използвани са термистори с отрицателен температурен коефициент (NTC), при които:

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3.12)$$

където :

$R(T)$ е електрическото съпротивление на термистора за измерваната температура T_m . Това е изходната величина на сензора, която се измерва от електронната система.

R_0 – номиналното (референтно) съпротивление на термистора при референтна температура. Обикновено $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K), като стойността R_0 се задава от производителя (напр. 10 k Ω при 25°C).

β Материална константа на термистора, наречена β -параметър (beta coefficient), с размерност [K].

T_m – измерваната абсолютна температура на термистора, изразена в келвини (K).

Използването на абсолютна температура е задължително за коректното прилагане на експоненциалния модел.

T_0 – референтната абсолютна температура, при която е определено съпротивлението R_0 , също изразена в келвини (K).

$\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_0}\right)$ – температурната разлика в обратни температури, която описва нелинейния характер на температурната зависимост на съпротивлението при полупроводникови материали.

б) Безконтактни инфрачервени сензори

Те измерват топлинното излъчване на тялото според закона на Стефан–Болцман:

$$P = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3.13)$$

където ε е коефициентът на излъчване за реални материали: 0.02–0.95.

σ – константа на Стефан–Болцман,

A – излъчваща площ [m^2],

T – абсолютна температура (K).

Подходящи са за бързи и неинвазивни измервания.

3.1.5. Химични и биохимични сензори (pH, газов състав, метаболити)

Химичните и биохимичните сензори измерват концентрацията на специфични йони, газове или биологични молекули и са критични за метаболитния мониторинг.

а) pH сензори

pH сензорите се базират на Нернстовото уравнение:

$$E = E_0 - \frac{RT}{F} \ln [H^+] \quad (3.14)$$

При 25°C:

$$E = E_0 - 59.16 \text{ mV} \cdot pH \quad (3.15)$$

E_0 Стандартният (референтен) електроден потенциал, определян от:

- материала и конструкцията на електрода;
- референтния електрод;
- температурата и състава на разтвора.

E_0 се определя по време на калибрацията и включва всички постоянни потенциални съставки на измервателната система.

R – универсална газова константа $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T – абсолютна температура (K)

F – константа на Фарадей $F = 96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$

$[H^+]$ – активност (приближено концентрация) на водородните йони

б) Газови сензори (O_2 , CO_2)

Газовите електрохимични сензори генерират ток, пропорционален на концентрацията:

$$I = k \cdot C_{gas} \quad (3.16)$$

I – изходен ток на сензора [mA или μA]

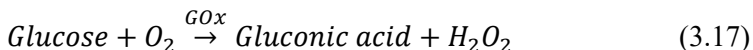
C_{gas} – концентрация на газа [ppm; % обем; mg/m^3]

k – коефициент на чувствителност [A/ppm , $\mu A/\%$]

Те се използват за анализ на дихателни газове и кръвни газови параметри.

в) Биосензори за метаболити

Биосензорите използват ензимно-катализираны реакции. Например при глюкозен сензор:



Генерираният ток е:

$$I = nF \frac{dC}{dt} \quad (3.18)$$

n – брой електрони, прехвърлени в една реакция
 F – константа на Фарадей
 $\frac{dC}{dt}$ – скорост на промяна на количеството вещество,
което позволява количествено определяне на концентрацията.

3.1.6. Класификация на биомедицинските сензори според принципа на преобразуване

Класификацията на биомедицинските сензори според принципа на преобразуване се основава на физичния механизъм, чрез който измерваната неелектрическа величина се трансформира в електрически сигнал. Този принцип определя чувствителността, линейността, шумовите характеристики и приложимостта на сензора в конкретни биомедицински условия (Pallàs-Areny & Webster, 2001).

a) Резистивни сензори

b)

Резистивните сензори се характеризират с промяна на електрическото съпротивление R в зависимост от измерваната физична или химична величина x :

$$R = f(x) \quad (3.19)$$

В биомедицинските приложения тази зависимост най-често се реализира чрез:

- температурна зависимост (термистори);
- механична деформация (тензометрични сензори);
- химично взаимодействие (хеморезистивни сензори).

Относителната промяна на съпротивлението при механична деформация се описва с:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (3.20)$$

където k е коефициентът на тензочувствителност, а ε – относителната деформация.

Резистивните сензори се отличават с проста реализация, но са чувствителни към температурен дрейф и шум.

б) Капацитивни сензори

Капацитивните сензори преобразуват измерваната величина в промяна на електрическия капацитет C , определян от:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (3.21)$$

където:

- A е площта на електродите;
- d – разстоянието между тях;
- ε_0 и ε_r – диелектричните константи.

Измерваната величина (налягане, движение, дишане) изменя d , A или ε_r , което води до промяна в капацитета:

$$\Delta C = k \cdot \Delta x \quad (3.22)$$

Капацитивните сензори се отличават с висока чувствителност и ниска консумация на енергия, което ги прави подходящи за носими и космически биомедицински системи.

в) Пиезоелектрични сензори

Пиезоелектричните сензори използват свойството на определени кристални материали да генерират електричен заряд при механично напрежение. Генерираният заряд Q е пропорционален на приложената сила F :

$$Q = d \cdot F \quad (3.23)$$

където d е пиезоелектричният коефициент.

Изходното напрежение на сензора е:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (3.24)$$

Пиезоелектричните сензори са особено подходящи за измерване на динамични процеси като:

- сърдечни тонове;
- пулсови вълни;
- вибрации и ускорения.

Те не са подходящи за измерване на статични величини поради утечка на заряда.

г) Оптоелектронни сензори

Оптоелектронните сензори преобразуват оптични сигнали в електрически чрез взаимодействие между светлина и биологична тъкан. Основният принцип се описва чрез закона на Beer–Lambert:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.25)$$

където:

- I_0 е входната светлинна интензивност;
- I – регистрираната интензивност;
- α – коефициентът на абсорбция;
- x – дебелината или концентрацията на абсорбиращата среда.

Оптоелектронните сензори са широко използвани за:

- фотоплетизмография;
- пулсова оксиметрия;
- мониторинг на кръвен поток.

Те осигуряват неинвазивност и висока информативност, но са чувствителни към външна светлина и артефакти от движение.

д) Електрохимични сензори

Електрохимичните сензори измерват електрически величини, породени от химични реакции или йонни процеси. Основните режими на работа са:

- потенциометричен;
- амперометричен;
- волтаметричен.

При потенциометричните сензори (напр. рН електроди) изходният потенциал се описва от Нернстовото уравнение:

$$E = E_0 - \frac{RT}{F} \ln a \quad (3.26)$$

където a е активността на съответния йон.

При амперометричните сензори измерваният ток е пропорционален на концентрацията:

$$I = nFAD \frac{C}{\delta} \quad (3.27)$$

където C е концентрацията на анализирувания компонент.

Електрохимичните сензори са ключови за мониторинг на:

- кръвни газове;
- метаболити;
- киселинно-алкален баланс.

Класификацията на биомедицинските сензори според принципа на преобразуване позволява целенасочен избор на сензорна технология в зависимост от измервания параметър, изискваната точност и условията на експлоатация.

3.2. Контактни и безконтактни сензорни технологии

3.2.1. Контактни сензори

Контактните сензори изискват директен физически контакт с кожата или тъканта. Те осигуряват висока точност и добро съотношение сигнал/шум, но са податливи на артефакти от движение и промени в контактното съпротивление.

Грешката, породена от нестабилен контакт, (Pallàs-Areny & Webster, 2001), може да бъде оценена като:

$$\Delta V = I \cdot \Delta Z_{contact} \quad (3.28)$$

3.2.2. Безконтактни сензорни технологии

Безконтактните сензори се използват за дългосрочен мониторинг и в условия, при които физическият контакт е нежелан или невъзможен.

а) Фотоплетизмографски (PPG) сензори

PPG методът се базира на закона на Beer–Lambert, описващ абсорбцията на светлина от биологични тъкани:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon c l} \quad (3.29)$$

където I_0 е началната интензивност на светлината, ε – коефициентът на абсорбция, c – концентрацията на хемоглобина, а l – оптичният път (Allen, 2007).

б) Радарни и микровълнови сензори

Тези сензори използват Доплеровия ефект за регистриране на микродвижения на гръдния кош, породени от дишането и сърдечната дейност:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \quad (3.30)$$

където:

v е скоростта на движение, а λ – дължината на вълната (Boric-Lubecke et al., 2008).

3.3. Изисквания към сензорите за космически приложения

Сензорите, предназначени за използване в космически мисии, трябва да функционират надеждно в условия, които се отличават съществено от земната среда. Основните дестабилизиращи фактори включват вакуум, йонизираща радиация, микрогравитация, механични натоварвания при изстрелване, както и екстремни и бързо променящи се температури (Griffin & French, 2004; Wertz et al., 2011).

Тези фактори оказват пряко въздействие върху физичните свойства на материалите, параметрите на електронните компоненти и дългосрочната стабилност на метрологичните характеристики на сензорите.

3.3.1. Температурни въздействия и термична стабилност

В условията на космическа орбита сензорите преминават периодически между слънчева и сенчеста страна на орбитата, което води до температурни цикли с амплитуда, достигаща десетки или стотици градуси по Целзий. Тези цикли предизвикват термичен дрейф на чувствителността, промени в нулевото отместване и ускорено стареене на материалите.

Температурната зависимост на чувствителността $S(T)$ може да се опише с линейна апроксимация:

$$S(T) = S_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.31)$$

където:

- $S(T)$ – чувствителността на сензора при температура T ;
- S_0 – номиналната чувствителност при референтна температура T_0 ;
- α – температурният коефициент на чувствителност;
- T_0 – референтната температура.

Минимизирането на температурния дрейф се постига чрез:

- избор на материали с нисък α ;
- температурна компенсация на хардуерно или софтуерно ниво;
- използване на термоизолация и активна терморегулация.

3.3.2. Радиационна устойчивост

Космическата радиация води до натрупване на доза (Total Ionizing Dose, TID) и до единични събития (Single Event Effects, SEE), които могат да причинят:

- дрейф на параметрите;

- временни или постоянни откази;
- деградация на чувствителните елементи.

За биомедицинските сензори, предназначени за продължителни мисии, се изисква радиационна устойчивост както на чувствителния елемент, така и на спомагателната електроника.

3.3.3. Механични натоварвания и микрогравитация

По време на изстрелване сензорите са подложени на вибрации и ударни натоварвания, които могат да се опишат чрез спектрална плътност на ускорението:

$$S_a(f) = \frac{a^2}{\Delta f} \quad (3.32)$$

В микрогравитационна среда отпадат гравитационно обусловените деформации, което изисква преосмисляне на калибрацията, особено при механични и капацитивни сензори.

3.4. Надеждност, калибрация и устойчивост в екстремни условия

3.4.1. Надеждност и модели на откази

Надеждността на сензорите за космически приложения е критичен параметър, тъй като ремонт или подмяна по време на мисията обикновено е невъзможна. Често използван модел за описание на вероятността за безотказна работа е експоненциалният закон:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.33)$$

където:

- $R(t)$ – вероятността сензорът да функционира без отказ до момент t ;
- λ – интензитетът на отказите, предполага се постоянен във времето;
- t – време на експлоатация.

Този модел е валиден за фазата на нормална експлоатация от т.нар. „вана на отказите“.

3.4.2. Калибрация и метрологична проследимост

Калибрацията на биомедицинските сензори се извършва чрез сравнение на изходния сигнал с референтна величина:

$$K = \frac{Y_{ref}}{Y_{meas}} \quad (3.34)$$

където:

Y_{ref} – стойността на референтната (еталонна) величина;

Y_{meas} – измерената стойност от сензора;

K – калибрационен коефициент.

В условията на космически мисии особено значение има дългосрочната стабилност на K , тъй като повторна калибрация често не е възможна. Това налага използването на:

- вътрешни референтни източници;
- самокалибриращи се структури;
- алгоритми за автокомпенсация (ISO 13485:2016).

3.4.3. Устойчивост в екстремни условия

Устойчивостта на сензорите в екстремни условия се определя от способността им да запазят функционалността и метрологичните си характеристики при комбинирано въздействие на:

- температура;
- радиация;
- вакуум;
- механични натоварвания.

Общият дрейф на измерването може да се представи като:

$$\Delta Y = \Delta Y_T + \Delta Y_R + \Delta Y_M \quad (3.35)$$

където съставните членове отразяват влиянието на температурата, радиацията и механичните фактори.

Изискванията към сензорите за космически приложения значително надхвърлят тези за наземни и клинични системи. Осигуряването на висока надеждност, стабилна калибрация и устойчивост в екстремни условия е ключово за достоверния

мониторинг на физиологичните и психо-физиологичните параметри на операторите в космическа среда.

3.5. Ограничения и източници на грешки при биомедицинските измервания

Биомедицинските измервания се характеризират със значителна сложност, обусловена от взаимодействието между измервателната система и живия организъм. За разлика от класическите инженерни измервания, при които обектът на измерване е детерминиран и относително стабилен, биологичните системи са нелинейни, нестационарни и стохастични по своята природа. Това води до наличие на множество източници на неопределеност и грешки, които ограничават точността и възпроизводимостта на резултатите.

3.5.1. Биологична вариабилност

Биологичната вариабилност представлява фундаментален източник на неопределеност и е свързана с индивидуалните и времеви различия в физиологичните процеси. Тя може да бъде класифицирана като:

- междуиндивидуална вариабилност, обусловена от възраст, пол, генетични фактори и здравословно състояние;
- вътреиндивидуална вариабилност, дължаща се на циркадни ритми, физическо натоварване, стрес и адаптационни процеси;
- контекстуална вариабилност, свързана с условията на измерване (поза, температура, психо-физиологично състояние).

Тази вариабилност води до флуктуации на измерваните сигнали, които не могат да бъдат елиминирани чрез класическа инструментална калибрация и се третира като стохастична компонента на грешката.

3.5.2. Инструментални грешки на сензора

Инструменталните грешки произтичат от физичните ограничения на сензора и спомагателната електроника. Основните механизми включват:

- шум на чувствителния елемент, включително термичен (Johnson–Nyquist) шум σ_{th}^2 :

$$\sigma_{th}^2 = 4k_B T R \Delta f \quad (3.36)$$

Където:

σ_{th}^2 – дисперсия на термичния шум

k_B – константа на Болцман

T – абсолютна температура [K]

R – електрическо съпротивление [Ω]

Δf – честотна лента [Hz]

- квантова грешка, породена от аналогово-цифровото преобразуване;
- нелинейност и хистерезис;
- дългосрочен дрейф, обусловен от стареене на материалите и деградация на електроди, мембрани или оптични компоненти.

Тези ефекти се обобщават в стандартното отклонение σ_{sensor} .

3.5.3. Влияние на околната среда

Околната среда оказва съществено влияние върху точността на биомедицинските измервания. Основните фактори включват:

- температурни вариации;
- електромагнитни смущения;
- механични вибрации;
- промени във влажността и атмосферното налягане.

В космически и авиационни приложения към тях се добавят вакуум, радиация и микрогравитация. Съвкупното влияние на тези фактори се представя чрез σ_{env} .

3.5.4. Артефакти от движение

Артефактите от движение представляват систематичен източник на грешки, особено при контактни сензори. Те възникват в резултат на:

- промяна на импеданса на кожно-електродния контакт;
- микропреместване на сензора спрямо тъканта;
- механично натоварване на измервателния елемент.

Математически измерваният сигнал може да бъде представен като:

$$x_{meas}(t) = x_{phys}(t) + x_{art}(t) + n(t) \quad (3.37)$$

където $x_{phys}(t)$ е реалния сигнал, $x_{art}(t)$ е компонентата, породена от артефакти, $n(t)$ компонента, породена от стохастични шумове.

3.5.5. Стареење и деградация на материалите

С течение на времето свойствата на материалите в сензорите се променят в резултат на:

- термични цикли;
- радиационно въздействие;
- химична корозия;
- механична умора.

Тези процеси водят до промяна на чувствителността, повишаване на шума и загуба на калибрационна стабилност, което налага използването на модели за дългосрочна корекция и оценка на неопределеността.

3.5.6. Обобщена оценка на измервателната грешка

При предположение за статистическа независимост на основните източници на грешки, общата стандартна неопределеност на измерването може да бъде оценена чрез корен от сумата на квадратите:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{sensor}^2 + \sigma_{env}^2 + \sigma_{bio}^2} \quad (3.38)$$

където:

- σ_{sensor} – стандартното отклонение, обусловено от сензора и електрониката;
- σ_{env} – неопределеността, породена от околната среда;
- σ_{bio} – вариабилността, присъща на биологичния обект.

Този подход е широко използван при анализа на грешките в комплексни биомедицински измервателни системи.

Ограниченията и източниците на грешки при биомедицинските измервания не могат да бъдат напълно елиминирани, но могат да бъдат идентифицирани, моделирани и минимизирани чрез адекватен избор на сензори, подходяща обработка на сигналите и коректна интерпретация на резултатите. Това е особено важно при мониторинг на оператори в екстремни условия, където надеждността и достоверността на измерените параметри са от критично значение.

3.5.7. Таблица на сензори, измервани показатели, апаратурни системи и приложения

Таблица 3.1 обединява данни за типа на сензора, измерваните физиологични и психо-физиологични показатели, използваните апаратурни системи и основните сфери на приложение. Особен акцент е поставен върху български научноприложни разработки, реализирани в рамките на национални и международни проекти, както и върху тяхната употреба в авиацията, космонавтиката, подводната и хипербарната медицина.

Таблица 3.1. Сензори, измервани показатели, апаратурни системи и приложения

Тип сензор	Измервани показатели	Апаратурна система	Приложение	Разработил
ЕКГ (електрокардиограф)	Сърдечен ритъм, вариабилност на сърдечната честота, аритмии	Холтер системи за 24- часов запис: ER02, ER02M, DBM, MA-01	Авиация, космическа медицина, хипербарни камери	ИКИТ-БАН
Фотоплетизмограф (Plethysmograph / PPG)	Ударен обем, периферна перфузия, индиректна оценка на кръвно налягане	DBM-WATCH НЕВРО-ЛАБ-Б	Подводна дейност, клинична медицина, хипербарни условия	ИКИТ-БАН DARA*
Пулсоксиметър	Наситеност на кръвта с кислород (SpO ₂), пулс	SPO-1	Височинни експедиции, авиация, хипербарни камери	ИКИТ-БАН
Респираторен модул	Дихателна честота, дихателен ритъм	НЕВРО-ЛАБ-Б, DBM	Космически полети, авиация, подводни и хипербарни условия	ИКИТ-БАН DARA
ЕЕГ (електроенцефалограф)	Когнитивно натоварване, внимание, мозъчни ритми	НЕВРО-ЛАБ-Б	Космически мисии, тренинг и селекция на оператори	ИКИТ-БАН DARA
ЕМГ (електромиограф)	Мускулна активност, координация, мускулна умора	Мобилни EMG системи MAR-2, ССОД „ЗОРА“	Космос, оператори на сложни технически системи	ИКИТ-БАН ИМБП-РАН**

Електродермална активност (EDA)	Психоемоционален стрес, активност на автономната нервна система	НЕВРО-ЛАБ-Б, БИОН-1	Авиация, психофизиологичен мониторинг	ИКИТ-БАН DARA
Мулти-сензорни интегрирани системи	Комбинирани физиологични и психофизиологични индекси	ССОД „ЗОРА“, НЕВРО-ЛАБ-Б, БИОН-1	Космически полети, подводни и хипербарни условия	ИКИТ-БАН ИМБП-РАН DARA
Системи за билатерална стимулация	Когнитивна активация, терапевтични ефекти	Апаратура за терапия на посттравматичен стрес	Рехабилитация, екстремни и стресови условия	ИКИТ-БАН
Сензори за апнея по време на сън	Дихателна активност, SpO ₂ , апнеични епизоди	Холтер система МА-01	Медицински мониторинг, авиация, космическа медицина	ИКИТ-БАН
Носими сензори за артериално кръвно налягане	Артериално кръвно налягане	DBML	Хипербарни камери, физиологичен мониторинг	ИКИТ-БАН
Носими мултисензорни модули	Сърдечен ритъм, SpO ₂ , дихателна честота, мускулна активност	DBM-SAN, DBML	Подводни операции, оператори на сложни системи	ИКИТ-БАН, DAC***

* Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA)

** Институт медико-биологических проблем РАН

*** Danish Aerospace Company

Таблица 3.1 систематизира основните типове сензори, използвани за мониторинг на физиологични и психо-физиологични показатели при оператори, работещи в екстремни условия. Обединяването на данните за измерваните параметри, апаратурните системи и сферите на приложение позволява цялостен поглед върху развитието и практическата реализация на съвременните методи за

биомедицински мониторинг в авиацията, космонавтиката, подводната и хипербарната медицина.

Анализът показва, че класическите биосигнали като електрокардиограма (ЕКГ), фотоплетизмография (PPG), електроенцефалография (ЕЕГ), електромиография (ЕМГ) и респираторни параметри остават фундаментални за оценката на функционалното състояние на човешкия организъм. Тяхното приложение обаче е значително разширено чрез използването на мобилни, носими и холтерни системи, позволяващи дългосрочен и непрекъснат мониторинг в реални експлоатационни условия, включително при микрогравитация, хипоксия, хипербария и повишено психоемоционално натоварване.

Особен акцент е поставен върху мултисензорните интегрирани системи, които комбинират няколко физиологични и психо-физиологични канали в единна апаратурна платформа. Този подход позволява формирането на комплексни индекси за работоспособност, стрес, умора и адаптация, които са от ключово значение за прогнозиране на риска и вземане на решения в критични ситуации.

Допълването на измервателните системи със средства за билатерална стимулация и терапевтични модули показва тенденция към интеграция на диагностични и интервенционни функции в рамките на една апаратурна концепция.

Съществен принос в тази област имат българските научноприложни разработки, реализирани основно от ИКИТ-БАН, някои от тях в сътрудничество с международни организации като DARA, ИМБП-РАН и Danish Aerospace Company. Тези разработки не само демонстрират високо ниво на научна и инженерна компетентност, но и намират реално приложение в национални и международни програми, свързани с авиационна, космическа и морска медицина. В този смисъл таблицата и нейното обобщение подчертават значението на интегрирания, мултисензорен подход като водеща тенденция в мониторинга на човека в екстремни и професионално критични условия.

ГЛАВА 4

АПАРАТУРНИ СИСТЕМИ ЗА СБОР И ОБРАБОТКА НА ДАННИ

4.1. Архитектура на апаратните системи.

Функционално описание

Апаратните системи за психо-физиологичен мониторинг се изграждат на базата на модулна архитектура, позволяваща гъвкаво разширяване, замяна на отделни блокове и адаптация към специфични експлоатационни условия. Архитектурата осигурява разделяне на функциите по нива, което повишава надеждността и улеснява сертификацията.



Фиг. 1. Архитектура на апаратните системи за сбор и обработка на данни

На фиг. 1 е показана най-обща блокова схема на апаратен изследователски комплекс за сбор и обработка на данни, състоящ се:

а) Сензори: ЕКГ, ЕЕГ, ЕМГ, КГР (Кожно Галванична Реакция), респираторни, инерциални, температурни.

- *Електрокардиография*

ЕКГ измерва електрическата активност на сърцето чрез кожни електроди. Този сензор предоставя информация за сърдечния ритъм, проводимостта на импулсите и наличието на аритмии, като се използва широко в клинични и изследователски условия за мониторинг на кардиоваскуларната функция.

- *ЕЕГ (Електроенцефалография)*

ЕЕГ регистрира електрическата активност на мозъка чрез електроди, поставени върху скалпа. Този сензор позволява анализ на мозъчните вълни и невронните модели, което е полезно за диагностика на епилепсия, сънни разстройства и когнитивни изследвания.

- *ЕМГ (Електромиография)*

ЕМГ измерва електрическата активност на мускулите при покой или съкращение. Този сензор се използва за оценка на мускулната функция, диагностика на невромускулни нарушения и изследване на мускулната умора и координация.

- *EDA (Electrodermal Activity) / кожно-гальванична реакция*

EDA измерва промяната в електропроводимостта на кожата, която се влияе от активността на симпатиковата нервна система. Сензорът се използва за мониторинг на стрес, емоционални реакции и автономна нервна активност в психо-физиологични изследвания.

- *Респираторни сензори*

Тези сензори измерват параметри на дишането, като честота, дълбочина и обем на вдишванията и издишванията. Те са важни за оценка на дихателната функция, физиологичния стрес и състоянието на автономната нервна система.

- *Инерциални сензори*

Инерциалните сензори включват акселерометри и жирокопи за измерване на ускорение и ъглови скорости. Те се използват за анализ на движение, поза, баланс и кинематични параметри в спортни, медицински и изследователски приложения.

б) Блок за Аналогова обработка на сигнала

Аналоговата обработка на сигнала представлява ключов етап от измервателната система, осигуряващ адаптиране на слабите биофизиологични сигнали към изискванията на модула за цифровизация на сигнала. Основната му цел е повишаване на отношението сигнал/шум, ограничаване на честотния обхват и защита на електронната апаратура и оператора.

Този блок осигурява предварителна обработка на сигналите от сензорите чрез усилване, филтрация и защита срещу електростатични разряди (ESD). Усилването гарантира подходящия диапазон за преобразуване, филтрацията отстранява нежелан шум и артефакти, а защитата ESD предотвратява повреди по електронните компоненти.

Процесът на аналогова обработка включва следните основни функции:

- *Усилване.*

Биофизиологичните сигнали (ЕКГ, ЕЕГ, ЕМГ, EDA и др.) се характеризират с малки амплитуди, обикновено в диапазона от няколко микроволта до няколко миливолта. Поради това е необходимо използването на нискошумови инструментални усилватели с високо входно съпротивление и голям коефициент на потискане на синфазни сигнали (CMRR), които осигуряват адекватно усилване без въвеждане на значителни нелинейни изкривявания.

- *Филтрация.*

Аналоговата филтрация се използва за ограничаване на честотния спектър на сигнала до информативния диапазон и за потискане на смущения с различен произход, включително мрежови шум (50/60 Hz), високочестотни електромагнитни смущения и нискочестотен дрейф на базовата линия.

Обикновено се прилагат комбинации от нискочестотни, високочестотни и лентови филтри, като честотните им характеристики се определят в зависимост от типа на измервания физиологичен сигнал.

- *Защита.*

Защитните схеми имат за цел да осигурят електрическа безопасност и надеждна работа на системата. Те включват защита от електростатични разряди (ESD), ограничаване на входните напрежения при преходни процеси, както и галванична изолация между пациента/оператора и останалата част от електронната система. Тези мерки са особено критични при медицински и авиационно-космически приложения, където се изисква висока степен на безопасност и отказоустойчивост.

в) Модул за преобразуване на данните (ADC)

Модулът за преобразуване на данните (Analog-to-Digital Converter, ADC) представлява ключов компонент в електронните измервателни и контролни системи, осигурявайки интерфейс между аналоговите сигнали, които характеризират физически процеси, и цифровите изчислителни блокове, способни на прецизна обработка и анализ. Основната функция на ADC е преобразуването на непрекъснатите във времето и амплитуда аналогови сигнали в дискретни цифрови стойности, което позволява тяхната ефективна обработка, съхранение и предаване с минимални загуби на информация и шум.

Входният сегмент на модула обикновено включва мултиплексори, които позволяват избор на множество аналогови канали, осигурявайки възможност за последователно измерване на различни сигнали с един и същ ADC. Това е особено важно при системи с ограничен хардуер, където се налага наблюдение на множество физични величини чрез един преобразувател.

От гледна точка на архитектурата и принципа на работа, ADC се класифицират в няколко основни типа, всеки със специфични характеристики по отношение на точност, скорост на преобразуване, шум и сложност:

1. *Със стъпково приближение (Successive Approximation Register, SAR)* – Този тип ADC използва регистър за последователни приближения, който стъпка по стъпка определя цифровото представяне на входния сигнал. SAR АЦП се отличават с добра точност и умерена скорост на преобразуване, което ги прави подходящи за измервателни системи, медицински апарати и индустриална автоматизация.
2. *Интегриращи (Dual-Slope/Integrating)* – Принципът на работа се основава на интегрирането на входния сигнал за определен период от време и последващо сравнение с опорен сигнал. Тези АЦП са изключително точни и устойчиви на шум, но с по-ниска скорост на преобразуване. Те се използват предимно в дигитални мултиметри и високоточни лабораторни измервателни системи.

3. *Флаш (Flash/Parallel)* – Flash АЦП използват масив от компаратори за едновременна оценка на нивото на входния сигнал. Те предоставят изключително висока скорост на преобразуване, но са сложни и разходоемки по отношение на хардуер, което ги прави подходящи за приложения с изискване за реалновременни измервания, като цифрова обработка на сигнал (DSP) и системи за събиране на големи обеми данни.
4. *Сигма-делта (Sigma-Delta, $\Delta\Sigma$)* – Тези АЦП осигуряват много висока точност чрез свръхсемплиране и шумово оформяне (noise shaping). Те са подходящи за прецизни измервания при нискочестотни сигнали и често се използват в аудио техника, медицински сензори и сензори за физически величини с малки амплитуди.

Изборът на конкретен тип АЦП зависи от изискванията за точност, скорост на преобразуване, енергопотребление и чувствителност към шум. В модерните цифрови системи често се прилагат хибридни решения, съчетаващи различни архитектури за оптимален баланс между производителност и ресурсна ефективност.

Като цяло модулът за преобразуване на данните е критичен за минимизиране на грешки и шум в системата, гарантирайки надеждното представяне на аналоговите сигнали в цифров вид, което осигурява ефективната им последваща обработка от изчислителния блок.

г) Изчислителен блок

Изчислителният блок представлява сърцевината на цифровата обработка в интегрираните измервателни системи, осигурявайки интелигентна интерпретация и трансформация на цифровите данни, получени от модула за преобразуване на аналоговите сигнали. Този блок се базира на съвременни микро и нанопроцесори, включително микроконтролери (MCU), цифрови сигнали процесори (DSP) и системи върху чип (SoC), които предлагат комбинация от изчислителна мощ, гъвкавост и интеграция на периферни модули.

Основните функции на изчислителния блок включват:

1. Обработка на цифровите сигнали

След преобразуването на аналоговите входни сигнали в цифров вид изчислителният блок изпълнява различни алгоритми за обработка, като филтрация, изчисляване на средни стойности, детекция на аномалии и извличане на характеристики. Тези операции позволяват намаляване на шума, компенсиране на артефакти и подготовка на данните за по-нататъшна интерпретация.

2. Оценка на състоянието

В зависимост от приложението, изчислителният блок извършва оценка на физиологични, биомеханични или други параметри на наблюдаваните системи или оператори. Това може да включва изчисляване на показатели като сърдечна честота, електромиографска активност, нивото на умора, стрес или дихателни функции. Подобни оценки са критични за системи, работещи в екстремни условия, като авиационни, космически или медицински приложения.

3. Интелигентно управление на данни

Изчислителният блок осъществява организацията, съхранението и предаването на данни към комуникационния интерфейс, като оптимизира честотата на пробирането и минимизира обема на предаваната информация. Това е особено важно при системи с ограничени енергийни ресурси и при условия на реалновременни измервания.

4. Интеграция с периферни модули

В съвременните архитектури, изчислителният блок често включва интегрирани интерфейси за комуникация, управление на паметта и периферни устройства, което осигурява плавна и надеждна връзка между сензорния модул, ADC, комуникационните протоколи и визуализацията или записването на данни.

Изчислителният блок представлява не само централна изчислителна единица, но и интелигентна платформа за сигнално разпознаване и адаптивно управление, която е способна да реагира динамично на променящите се условия на измерване и експлоатация. Надеждността, точността и времевата ефективност на

този блок са критични за цялостното функциониране на системата, особено в приложения с високи изисквания за безопасност и прецизност.

д) Комуникационен интерфейс

Комуникационният интерфейс осигурява връзката между изчислителния блок и външни устройства или системи, позволявайки ефективен трансфер на данни, командни сигнали и телеметрична информация. Този блок играе критична роля в интегрираните измервателни и контролни системи, като гарантира надеждност, ниска латентност и съвместимост с различни комуникационни стандарти.

Основните функции на комуникационния интерфейс включват:

1. Пренос на данни

Интерфейсът осъществява цифрово предаване на обработените данни към операторски станции, бордови компютри или външни съхраняващи устройства. Това позволява непрекъснат мониторинг и контрол на системата в реално време.

Преносът на данни представлява ключов компонент в интегрираните системи за мониторинг на физиологични параметри, тъй като осигурява връзката между сензорните модули и крайния потребител или аналитичната платформа.

Интерфейсът за пренос на данни позволява цифрово предаване на обработената информация към операторски станции, бордови компютри или външни устройства за съхранение.

Дигиталното предаване на данни гарантира висока точност, защита от шумове и загуба на сигнал, което е особено важно при екстремни условия, където оперативната надеждност и непрекъсваемостта на потока от информация са критични. Освен това цифровата комуникация позволява едновременно предаване на множество параметри – включително електромиографски сигнали, динамометрични данни и изчислени индекси на мускулна умора – без значителни загуби на информация.

Системата може да използва както кабелни, така и безжични комуникационни протоколи, в зависимост от специфичните

изисквания на приложението. Кабелният трансфер осигурява максимална стабилност и минимално забавяне, докато безжичните интерфейси предоставят мобилност и гъвкавост при използване в реални условия, като пилотиран полет, водолазни операции или космически мисии.

Целта на интегрирания пренос на данни е да се осигури непрекъснат мониторинг и контрол в реално време, позволявайки на операторите и изследователите да наблюдават физиологичното състояние на субектите, да вземат съвременни решения и да коригират тренировъчни или оперативни режими при необходимост.

Освен оперативното приложение, преносът на данни подпомага и съхранението на информация за по-късен анализ, статистическа обработка и научни изследвания, като така системата става инструмент за комплексно изследване на човешката физиология в екстремни условия.

2. Поддръжка на множество протоколи

Съвременните интерфейсни решения в интегрираните системи за мониторинг на физиологични параметри са проектирани да осигурят висока съвместимост и гъвкавост чрез поддръжка на различни комуникационни протоколи. Това позволява системата да се адаптира към специфичните изисквания на различни оперативни среди – от лабораторни тестове до реални условия в авиацията, космическите мисии и водолазните операции.

Поддържаните протоколи включват:

- *CAN (Controller Area Network)* – широко използван в авиационни и космически системи, протоколът CAN осигурява надежден обмен на данни в реално време при високи натоварвания и електромагнитни смущения. Той е оптимален за системи, изискващи детерминирана комуникация и висока устойчивост на грешки.
- *UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)* – асинхронният сериен интерфейс е подходящ за point-to-point комуникация, характеризираща се с ниска сложност на хардуера и лесна интеграция. UART е предпочитан при приложения с ограничени ресурси, където минималната латентност е критична.

- *SPI (Serial Peripheral Interface)* – високоскоростен интерфейс за комуникация на кратки разстояния между микроконтролери и периферни устройства. SPI осигурява ниска латентност и възможност за бърз обмен на големи обеми данни, което е важно при реално време обработка на физиологични сигнали.
- *Ethernet* – стандарт за локални мрежи, който предлага високоскоростен обмен на данни и възможност за дистанционно наблюдение и контрол на системата. Ethernet позволява интеграция със съществуващи ИТ инфраструктури и поддържа сложни комуникационни архитектури.
- *SpaceWire* – специализиран протокол за космически приложения, създаден за прецизен и надежден обмен на данни между бордови системи. SpaceWire осигурява висока устойчивост на грешки и минимална латентност, което го прави подходящ за критични задачи в условия на микрогравитация.

Поддръжката на множество протоколи осигурява системата с необходимата адаптивност, позволявайки избор на най-подходящия интерфейс според изискванията за скорост, надеждност и операционна среда. Това повишава интеграционната съвместимост и осигурява стабилност при пренос на критична информация, което е особено важно за мониторинг на физиологични параметри в реално време при екстремни условия.

3. Сигурност и устойчивост на грешки

Високата надеждност на комуникационния интерфейс е критичен фактор за системите за мониторинг на физиологични параметри, особено при работа в екстремни условия, където оперативната устойчивост и непрекъсваемостта на данните са от съществено значение. За постигане на необходимото ниво на сигурност, интерфейсът интегрира съвременни методи за корекция на грешки, контрол на потока и синхронизация.

Методите за корекция на грешки позволяват откриване и автоматично поправяне на възникнали неточности при предаването на цифровите сигнали, което минимизира риска от загуба на критична информация. Контролът на потока регулира скоростта на предаване и приемане на данни между устройствата, предотвратявайки претоварване на каналите и допълнителни

забавяния. Синхронизацията на комуникацията осигурява правилно подреждане на пакетите с данни и гарантира целостта на информацията, независимо от електромагнитни смущения или случайни прекъсвания.

Тази комбинация от методи осигурява устойчивост на шум и интерференции, които са често срещани в авиационни, космически и подводни среди, където системите се използват. В резултат, интерфейсът поддържа надежден и непрекъснат поток от данни в реално време, като гарантира, че критичната информация за физиологичното състояние на операторите се предава коректно и своевременно, което е основа за безопасност и ефективно управление на риска.

е) Визуализация и запис на данни

Блокът за визуализация и запис представлява интерфейс между измервателната система и крайния потребител, като същевременно осигурява дългосрочно съхранение на информацията за последващ анализ. Този модул има двойна функция: оперативно наблюдение на физиологичните параметри и архивиране на ключови данни за последващи изследвания, моделиране и оценка на изпълнението на операторите.

Основните компоненти и функционални възможности включват:

1. Операторски интерфейс

Операторският интерфейс предоставя удобни средства за визуализация на данните в реално време, включително графики, индикатори, числови стойности и алармени сигнали. Така операторът получава ясна и навременна информация за състоянието на системата, което позволява бързо вземане на решения в динамично променяща се среда. Визуализацията подпомага разпознаването на критични събития и аномалии, като същевременно осигурява интуитивно представяне на сложни физиологични показатели.

2. Бордова система за управление

Визуализацията може да бъде интегрирана директно в бордовите устройства на системата, което е особено важно за автономни или мобилни платформи, където непрекъснатата връзка с външни станции може да е ограничена. Тази функционалност гарантира, че операторът или автоматичните контролни алгоритми имат достъп до критичните данни локално, като се поддържа непрекъснат контрол и безопасност на изпълнението на задачите.

3. Памет и телеметрия

Модулът за памет осигурява надеждно съхранение на данни за последващ анализ, включително статистическа обработка и моделиране на физиологичните процеси. Телеметричните функции позволяват дистанционно наблюдение и оценка на системата, което е особено важно при авиационни, космически и отдалечени измервателни приложения. Тези функции осигуряват достъп до данните независимо от местоположението на оператора и условията на средата.

Ефективната интеграция на визуализацията и записа гарантира, че критичните данни са лесно достъпни за анализ, проследяване и архивиране. Освен това системата оптимизира използването на ресурси, минимизира риска от загуба на информация и поддържа надеждна оперативна работа в реално време, което е от съществено значение за приложения в екстремни условия.

4.2. Сензорна интеграция и синхронизация на данните

Сензорната интеграция представлява ключов методологичен и технологичен аспект при съвременните многоканални измервателни системи, особено в областта на физиологичните изследвания. Тя включва обединяване, съпоставяне и съвместен анализ на данни, получени от хетерогенни сензорни канали, които се различават по честота на дискретизация, динамичен обхват, латентност и чувствителност.

Същественото предизвикателство при този процес произтича от факта, че физиологичните сигнали се характеризират с различна времева динамика – от бързи електрофизиологични процеси (напр. електромиографска или електроенцефалографска

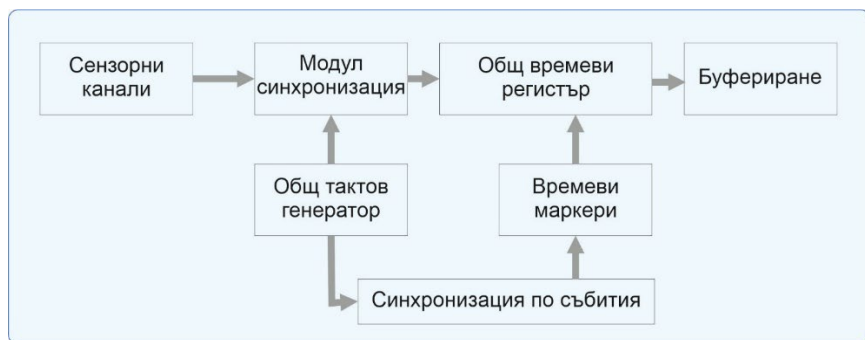
активност) до по-бавни хемодинамични и терморегулаторни реакции. Поради това несъответствията във времеовото подравняване между каналите могат да доведат до систематични грешки при интерпретацията, включително до погрешни заключения относно причинно-следствените зависимости между наблюдаваните физиологични реакции.

Точната времева съгласуваност изисква наличието на обща и стабилна времева база, както и механизми за детерминирано маркиране на всяка измервателна проба. Използването на централизирани тактови генератори, хардуерна синхронизация и времеви маркери позволява минимизиране на фазовите отмествания и времевата нестабилност между отделните канали. В допълнение, събитийно-ориентираната синхронизация осигурява възможност за обвързване на измерванията с конкретни физиологични или експериментални стимули, което допълнително повишава аналитичната стойност на събраните данни.

От методологична гледна точка, ефективната сензорна интеграция създава предпоставки за мултимодален анализ, при който взаимовръзките между различни физиологични системи могат да бъдат изследвани в единна времева рамка. Това е особено важно при оценка на комплексни реакции на човешкия организъм в екстремни условия, където синхронът между нервна, мускулна и вегетативна активност има определящо значение за научната валидност и практическата приложимост на резултатите.

В този контекст постигането на висока времева съгласуваност не следва да се разглежда единствено като техническо изискване, а като фундаментално условие за достоверност и интерпретируемост на данните при интегрирани физиологични измервания.

Основните блокове и връзките между тях, онагледяващи интеграцията и синхронизацията на данните от сложни измервателни системи на физиологични параметри, са показани на фиг. 2.



Фиг. 2. Функционална схема на интеграция и синхронизация на данните

Функционалната схема на фиг. 2 се състои от следните основни блокове:

1. Сензорни канали

Сензорните канали представляват първичното ниво за регистриране на физични величини (напр. температура, налягане, електрическа активност, механично усилие). Всеки канал включва сензор и съответна аналогова или цифрова фронт-енд обработка. Основната им функция е да преобразуват измерваните физични параметри в електрически сигнали, подходящи за последваща цифрова обработка, като същевременно се запазва максимална информативност и минимално ниво на шум.

2. Синхронизиращ модул

Синхронизиращият модул осигурява времево подравняване на данните, постъпващи от различните сензорни канали. Неговата роля е да гарантира, че пробите от всички канали се отнасят към един и същ времеви момент или към точно дефинирани времеви интервали. Това е критично при многоканални измервания, при които корелационният анализ и сравнението между каналите изискват строга времева съгласуваност.

3. Общ тактов генератор

Общият тактов генератор служи като централен източник на времева база за цялата система. Той генерира стабилен и прецизен

тактов сигнал, който се използва както от синхронизиращия модул, така и от механизмите за времево маркиране. Качеството на този блок (честотна стабилност, джитер, температурна зависимост) пряко влияе върху точността и възпроизводимостта на измерванията.

4. Събитийна синхронизация

Събитийната синхронизация реализира механизъм за обвързване на измервателния процес с външни или вътрешни събития (тригери). Тя позволява стартиране, спиране или маркиране на измервания при настъпване на предварително дефинирани условия. Този блок е особено важен при експерименти, при които анализът е ориентиран към реакции на системата спрямо конкретни стимули или събития.

5. Времеви маркери (timestamps)

Времевите маркери представляват цифрово кодирана информация за времето на възникване на всяка измерена проба или събитие. Те се генерират на базата на общия тактов генератор и осигуряват възможност за точно времево позициониране на данните в последващ анализ. Това позволява реконструкция на времевата динамика на процесите и синхронизация с външни системи или измервателни платформи.

6. Общ времеви регистър

Общият времеви регистър изпълнява функцията на централизирано хранилище за текущото системно време. Той приема информация от блока за времеви маркери и я асоциира с входящите данни от синхронизиращия модул. По този начин се осигурява еднозначна и непротиворечива времева референция за всички измервателни канали.

7. Буферизация

Буферизацията представлява междинен етап за временно съхранение на синхронизираните и времево маркирани данни. Основната ѝ функция е да компенсира разликите между скоростта на генериране на данни и скоростта на тяхната последваща обработка, запис или предаване. Чрез буферизацията се

предотвратява загуба на данни и се повишава надеждността на цялата система.

Описаната архитектура реализира завършена и концептуално последователна рамка за многоканална синхронизирана измервателна система, ориентирана към приложения с високи изисквания към времевата точност, детерминираността и надеждността на данните. Чрез използването на обща времева база, централизирани механизми за синхронизация и унифицирано времево маркиране се осигурява строга времева съгласуваност между всички сензорни канали, независимо от техните индивидуални динамични характеристики и честоти на дискретизация.

Интегрирането на събитийно-ориентирани механизми позволява измервателният процес да бъде обвързан с конкретни вътрешни или външни стимули, което разширява аналитичните възможности на системата. Това създава условия за прецизно изследване на причинно-следствени зависимости и за реконструкция на времевата последователност на комплексни процеси, което е от съществено значение при експериментални и диагностични приложения.

Буферизационните механизми допринасят за повишаване на устойчивостта и надеждността на системата, като осигуряват адаптация към вариации в скоростта на генериране, обработка и предаване на данни. По този начин се минимизира рискът от загуба на информация и се гарантира целостта на измервателния поток, дори при работа в среди с ограничени ресурси или повишени смущения.

В резултат, архитектурата предоставя гъвкава и мащабируема основа за реализация на съвременни измервателни платформи, приложими в широк спектър от области — от фундаментални научни изследвания и биомедицински системи до космически, авиационни и други вградени системи. Нейните принципи отговарят на изискванията за висока времева резолюция, възпроизводимост и надеждност, което я прави подходяща за анализ на сложни, мултимодални процеси в условия, където точната времева корелация на данните е критичен фактор за валидността на получените резултати.

4.3. Аналогово-цифрово преобразуване и предварителна обработка

Съвременните измервателни системи за регистриране на физиологични и физични величини се характеризират с нарастващи изисквания към точността, надеждността и възпроизводимостта на получените данни. В основата на тези системи стои последователност от функционални блокове, чиято задача е да осигурят коректно преобразуване на измерваната величина – от първичното ѝ възприемане до формирането на цифров сигнал, подходящ за последващ анализ и интерпретация. Проектирането на такава архитектура изисква системен подход, който отчита както характеристиките на използваните сензори, така и ограниченията, наложени от аналоговата и цифровата обработка на сигналите.

Първичният етап на измервателния процес се реализира от сензорния елемент, който преобразува наблюдаваната величина в електрически сигнал с относително малка амплитуда и често неблагоприятно съотношение сигнал/шум. Това налага използването на специализирани усилвателни структури с висока точност и стабилност, които да адаптират сигнала към динамичния обхват на следващите етапи. В този контекст инструменталните усилватели заемат централно място, тъй като осигуряват диференциално усилване, потискане на общорежимните смущения и минимизиране на систематичните грешки.

След усилването сигналът подлежи на аналогова честотна обработка, чиято основна цел е ограничаване на спектралния обхват и потискане на високочестотните шумови компоненти. Аналоговата филтрация изпълнява и критичната функция на филтриране преди дискретизация (*anti-aliasing filtering*), като предотвратява появата на спектрални изкривявания при последващото аналогово-цифрово преобразуване. Правилният избор на гранични честоти и характеристика на филтъра е съществен за запазване на информативното съдържание на сигнала.

Аналогово-цифровото преобразуване представлява преходния етап между аналоговия и цифровия домейн, при който сигналът се дискретизира и квантува с определена честота и резолюция. Качеството на този етап оказва пряко влияние върху

точността на измерванията и възможностите за последваща цифрова обработка. Поради това параметрите на АЦП следва да бъдат съгласувани с динамичните характеристики на сигнала и изискванията на приложението.

Заключителният етап на архитектурата е цифровата филтрация, която предоставя значителна гъвкавост при обработката на данните. Чрез прилагане на цифрови филтри и алгоритми за обработка на сигнали може да се постигне допълнително потискане на шум, подобряване на съотношението сигнал/шум и извличане на диагностично или аналитично значими характеристики. В този смисъл цифровата обработка допълва и надгражда аналоговите етапи, като осигурява адаптивност и повторяемост на измервателния процес. Функционалната схема за аналогоцифрово преобразуване с предварителна обработка на данните е показана на фиг. 3.



Фиг. 3. Функционална схема за аналогоцифрово преобразуване с предварителна обработка

Показаната на фиг. 3 функционална схема се състои от следните блокове:

а) Сензор

Преобразува измерваната физична или физиологична величина електрически сигнал с малка амплитуда, често податлив на шум и смущения с различен произход. Сензорният блок представлява първичното и концептуално най-важно ниво на измервателната система, тъй като той осъществява директния контакт между изследваната физична или физиологична величина и електронната част на системата. Основната функция на сензора е преобразуването на измерваната величина в електрически сигнал, като този процес следва да бъде реализиран с висока чувствителност, линейност и възпроизводимост.

В зависимост от приложението, сензорите могат да бъдат базирани на различни физични принципи, включително резистивни, капацитивни, пиезоелектрични, термоелектрични, оптични или електрохимични ефекти. При биомедицинските измервания широко се използват биопотенциални електроди, тензорезистивни и инерционни сензори, които позволяват регистриране на електрическа активност, механични усилия и движения на човешкото тяло. Независимо от конкретната реализация, сензорният елемент следва да бъде съобразен с диапазона и динамиката на изследвания сигнал.

Исходният сигнал на сензора обикновено се характеризира с ниска амплитуда и висока податливост на шум и смущения, породени както от околната среда, така и от самия измервателен процес. Това налага особено внимание при избора на чувствителност, изходно съпротивление и шумови характеристики на сензора. Освен това параметри като температурна стабилност, дългосрочен дрейф и хистерезис оказват съществено влияние върху точността и надеждността на измерванията.

Допълнителен аспект при проектирането на сензорния блок е механичната и електрическата интеграция със системата. При физиологични приложения това включва биосъвместимост на материалите, стабилен контакт със съответната анатомична област и минимизиране на артефактите, свързани с движение. От електрическа гледна точка се изисква подходящо екраниране, заземяване и защита от електромагнитни смущения.

Казано накратко, сензорният блок определя пределната чувствителност и информативност на цялата измервателна система. Неговите характеристики задават изискванията към всички последващи етапи на сигналната обработка, което го превръща в критичен елемент за постигане на висока точност, надеждност и научна валидност на резултатите.

б) Инструментален усилвател

Блокът на инструменталния усилвател изпълнява ключова функция в аналоговия фронт-енд на измервателната система, като осигурява прецизно усиление на слабите диференциални сигнали, генерирани от сензорния елемент. Основното му предназначение е

да повиши амплитудата на полезния сигнал до ниво, подходящо за последваща аналогова и цифрова обработка, без съществено влошаване на неговите метрологични характеристики.

Съществено предимство на инструменталния усилвател е неговият висок коефициент на потискане на общорежимните сигнали (CMRR — Common-Mode Rejection Ratio), който позволява ефективно потискане на смущения, индуцирани едновременно върху двата входа, като например електромагнитни интерференции, индустриален шум или паразитни напрежения от захранването. Това свойство е особено важно при измервания на биопотенциали и други нискоамплитудни сигнали, където нивото на смущенията може да бъде сравнимо или дори по-високо от полезния сигнал. CMRR се дефинира като отношението между диференциалното усилване (усилването на разликата между двата входни сигнала) A_d и общорежимното (усилването на сигнала, който се появява еднакъв и едновременно на двата входа на усилвателя) усилване A_{cm} :

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \quad (4.1)$$

Обикновено се изразява в децибели (dB):

$$CMRR_{db} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_{cm}} \quad (4.2)$$

Инструменталните усилватели се характеризират още с високо входно съпротивление, което минимизира натоварването на сензора и предотвратява изкривяване на измерваната величина. В същото време ниското изходно съпротивление улеснява свързването със следващите етапи на обработка, включително аналоговите филтри и аналогово-цифровите преобразуватели. Регулируемият коефициент на усилване позволява гъвкаво адаптиране на системата към различни типове сензори и измервателни диапазони.

От гледна точка на точността и стабилността, инструменталният усилвател следва да притежава нисък собствен шум, минимален входен офсет и малък температурен дрейф. Тези характеристики са критични за дългосрочни измервания и за приложения, при които се изисква висока повторямост и надеждност на резултатите. Допълнително, симетричната

архитектура на инструменталния усилвател допринася за добра линейност и широк динамичен обхват.

Блокът на инструменталния усилвател представлява фундаментален елемент в измервателната верига, който определя границите на чувствителността и точността на системата. Чрез съчетаване на високо диференциално усилване, ефективно потискане на общорежимните смущения и стабилни метрологични характеристики този блок създава надеждна основа за последваща аналогова и цифрова обработка на сигналите.

в) Аналогов филтър

Аналоговият филтър представлява съществен функционален блок в аналоговия фронт-енд на измервателната система, чиято основна роля е честотното формиране на сигнала преди неговото аналогово-цифрово преобразуване. Чрез целенасочено ограничаване на спектралния обхват филтърът осигурява пропускане на информативните честотни компоненти и ефективно потискане на нежеланите шумови и смущаващи сигнали.

Една от ключовите функции на аналоговия филтър е реализирането на преддискретизационно филтриране, чиято цел е предотвратяване на спектралното припокриване при дискретизацията. Високочестотните компоненти, разположени над половината от честотата на дискретизация, могат да се отразят в полезния спектър на сигнала под формата на алиасинг изкривявания. Чрез подходящ избор на гранична честота и наклон на затихване аналоговият филтър минимизира този ефект и гарантира коректно цифрово представяне на сигнала.

В зависимост от приложението, аналоговите филтри могат да бъдат реализирани като нискочестотни, високочестотни, лентови или режекторни структури, както и в различни топологии – пасивни или активни. При измервателни и биомедицински системи най-често се използват активни нискочестотни филтри с контролирана амплитудно-честотна характеристика, които осигуряват компромис между стръмност на преходната област, фазови изкривявания и стабилност.

Качествените показатели на аналоговия филтър, като линейност, фазова характеристика, температурна стабилност и

собствен шум, оказват пряко влияние върху точността и възпроизводимостта на измерванията. Неподходящо проектиран филтър може да доведе до изкривяване на времевата форма на сигнала или до загуба на информативни компоненти, което е критично при анализ на физиологични сигнали с комплексна динамика.

Блокът за аналогова филтрация изпълнява ролята на граничен и защитен етап между усилвателната част и аналогово-цифровия преобразувател. Чрез комбиниране на шумопотискане, честотно ограничаване и антиалиасинг функция той създава предпоставки за надеждно и висококачествено цифрово представяне на измерваните сигнали.

г) Аналогово-цифров преобразувател

Аналогово-цифровият преобразувател представлява ключов преходен блок между аналоговия и цифровия домейн на измервателната система. Неговата основна функция е преобразуването на непрекъснатия по време и амплитуда аналогов сигнал в дискретен цифров представител, който може да бъде съхраняван, предаван и подлаган на алгоритмична обработка. Качеството на този етап оказва съществено влияние върху точността, динамичния обхват и аналитичната стойност на получените данни.

Процесът на аналогово-цифрово преобразуване включва два основни етапа – дискретизация и квантуване. Дискретизацията представлява вземане на проби от аналоговия сигнал през равни времеви интервали, определени от честотата на дискретизация.

Изборът на тази честота следва да бъде съобразен със спектралното съдържание на сигнала и изискванията на теоремата на Найкуист–Шанън, за да се избегнат алиасинг изкривявания.

Квантуването, от своя страна, описва процеса на апроксимация на амплитудата на всяка проба към най-близкото допустимо ниво, определено от резолюцията на АЦП.

Резолюцията на аналогово-цифровия преобразувател, обикновено изразявана в битове, определя броя на наличните квантизационни нива и минималната различима промяна на входния сигнал. Повисоката резолюция позволява по-точно представяне на амплитудата, но поставя по-високи изисквания към шумовите

характеристики и стабилността на предходните аналогови етапи. В този контекст динамичният обхват и ефективният брой битове (ENOB – Effective Number of Bits) са важни показатели за реалната производителност на АЦП в практическа среда. ENOB се определя от измереното съотношение сигнал/шум и изкривявания (SINAD – Signal to Noise And Distortion) и се дефинира чрез връзката:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02}, \quad (4.3)$$

където:

$$SINAD_{db} = 20 \log_{10} \frac{V_{signal}}{V_{noise+distortion}} \quad (4.4)$$

Допълнителни фактори, които влияят върху качеството на аналогово-цифровото преобразуване, включват времевата стабилност на тактовия сигнал при дискретизацията, нелинейностите и офсетните грешки. При прецизни измервателни и биомедицински системи тези параметри могат да доведат до изкривяване на сигнала или до загуба на информативни компоненти, ако не бъдат адекватно контролирани.

В обобщение, аналогово-цифровият преобразувател не следва да се разглежда единствено като средство за цифровизация, а като критичен метрологичен елемент, който определя границите на точност, възпроизводимост и надеждност на измервателната система. Правилният избор и интеграция на АЦП са предпоставка за коректен анализ на сигналите и за пълноценно използване на възможностите на цифровата обработка.

д) Цифрова филтрация

Цифровата филтрация представлява заключителен и изключително гъвкав етап в обработката на измервателните сигнали, при който вече дискретизираният и квантуван сигнал се подлага на алгоритмична обработка с цел подобряване на неговите качествени и аналитични характеристики. За разлика от аналоговата филтрация, цифровата филтрация позволява прецизен контрол върху

честотните, фазовите и амплитудните свойства на филтрите, както и висока степен на възпроизводимост и адаптивност.

В практиката най-широко приложение намират филтрите с крайна импулсна характеристика (FIR) и филтрите с безкрайна импулсна характеристика (IIR). FIR филтрите се отличават с линейна фазова характеристика и гарантирана стабилност, което ги прави особено подходящи за приложения, при които е критично запазването на формата на сигнала във времевата област. IIR филтрите, от своя страна, позволяват постигане на по-стръмни честотни характеристики с по-ниска изчислителна сложност, но изискват внимателен контрол на стабилността и фазовите изкривявания.

Допълнително, адаптивните филтри осигуряват възможност за динамично приспособяване на параметрите на филтрация в зависимост от променящите се свойства на сигнала или шумовата среда. Това е особено ценно при анализ на нестационарни сигнали, характерни за физиологичните процеси, където статистическите характеристики на сигнала могат да се изменят във времето.

Основните цели на цифровата филтрация включват потискане на шумовите компоненти, подобряване на съотношението сигнал/шум и извличане на информативни характеристики, релевантни за последващ анализ или диагностика. Чрез подходящо проектирани цифрови филтри могат да бъдат реализирани функции като изглаждане на сигнала, разделяне на честотни компоненти, откриване на събития и подготовка на данните за по-високо ниво на обработка.

В обобщение, цифровата филтрация представлява мощен инструмент за повишаване на информативната стойност на измервателните данни. Нейната алгоритмична природа позволява гъвкаво адаптиране към конкретното приложение и допринася съществено за надеждността, точността и интерпретируемостта на резултатите в съвременните измервателни и биомедицински изследвания.

Разглежданата блокова архитектура представлява цялостно и методологично обосновано системно решение за изграждане на прецизни измервателни канали, при които всеки функционален блок допринася за запазване на информативното съдържание и метрологичната достоверност на сигнала. Последователното

преминаване през етапите на сензорно преобразуване, прецизно усилване, аналогово честотно ограничаване, аналогово-цифрово преобразуване и цифрова обработка осигурява оптимални условия за минимизиране на шумовете, изкривяванията и времевите неточности.

Тази архитектура е приложима в широк спектър от научни и инженерни области, включително биомедицински изследвания, вградени системи и експериментални платформи, при които се поставят високи изисквания към точността, стабилността и времевата характеристика на сигналите. Нейната гъвкавост позволява адаптация към различни типове сензори и измервателни задачи, а системният подход към обработката на сигналите създава предпоставки за надежден анализ и интерпретация на сложни, мултимодални процеси.

4.4. Софтуерни средства за анализ и визуализация

Софтуерните средства за анализ и визуализация заемат централно място в системите за мониторинг на физиологичните параметри на оператори, работещи в екстремни условия, като пилоти, космонавти и водолази. Този софтуерен слой осигурява трансформацията на първичните биосигнали, регистрирани от сензорни системи, в информативни показатели, позволяващи оценка на функционалното състояние, работоспособността и нивото на натоварване на човешкия организъм в реално време или при последващ анализ (фиг. 4).



Фиг.4. Блокова схема на софтуерните средства за анализ и визуализация

Първият етап от софтуерната обработка включва предварителна обработка на физиологичните сигнали, като електромиограма (EMG), електрокардиограма (ECG),

електроенцефалограма (EEG), показатели за дишане, оксигенация и кожна проводимост. В този етап се реализират алгоритми за филтрация на смущения, обусловени от движение, вибрации, електромагнитни влияния и промени в контактното съпротивление на електродите, които са особено характерни за авиационна, космическа и подводна среда. Допълнително се извършва нормализация и адаптивна корекция на сигналите с цел компенсиране на индивидуалните физиологични различия между операторите.

След предварителната обработка софтуерният слой осъществява извличане на информативни характеристики, които отразяват функционалното състояние на организма и неговата реакция на натоварване и стрес. В зависимост от типа сензори и изследваните процеси това включва времеви и честотни характеристики, показатели за вариабилност на сърдечния ритъм, параметри на мускулната активност и умора, индекси на централната и периферната регулация, както и комплексни показатели, свързани с когнитивното и психо-физиологичното натоварване. Подборът и комбинирането на тези характеристики се извършва с оглед висока чувствителност към ранни признаци на функционално изчерпване или риск за оператора.

На базата на извлечените характеристики се реализира изчисляване на интегрални индекси, които обобщават информацията от множество физиологични канали в ограничен брой количествени оценки. Такива индекси могат да отразяват нивото на умора, стрес, адаптация, работоспособност или безопасност на оператора.

С цел обективна и количествено измерима оценка на функционалното състояние на оператори, работещи в екстремни условия (пилоти, космонавти и водолази), софтуерният слой реализира набор от формализирани индекси, базирани на обработката и обединяването на множество физиологични параметри. Тези индекси позволяват редуциране на високата размерност на данните и осигуряват стандартизирана основа за мониторинг, сравнение и вземане на решения.

1. Индекс на физиологично натоварване (Physiological Load Index, PLI)

Индексът на физиологично натоварване обобщава информацията от сърдечно-съдовата, дихателната и мускулната системи и се използва за оценка на текущото функционално напрежение на организма. Формално той може да бъде дефиниран като претеглена сума от нормализирани характеристики:

$$PLI = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \frac{X_i - X_{i,rest}}{X_{i,max} - X_{i,rest}} \quad (4.5)$$

Където:

X_i са текущите стойности на физиологичните параметри (напр. сърдечна честота, минутна вентилация, средна EMG-активност),

$X_{i,rest}$ и $X_{i,max}$ са индивидуално определени референтни стойности, а

w_i са теглови коефициенти, отразяващи относителната значимост на всеки параметър.

2. Индекс на умора на мускулната система (Muscle Fatigue Index, MFI)

За оценка на мускулната умора се използват характеристики на електромиографските сигнали, като средна честота (MNF) или медианна честота (MDF). Един широко приложим формализиран индекс е:

$$MFI = 1 - \frac{MDF(t)}{MDF_{baseline}} \quad (4.6)$$

Където:

$MDF(t)$ е медианната честота на EMG сигнала в текущия момент, а $MDF_{baseline}$ е базовата стойност, измерена при ненатоварено състояние.

Нарастването на индекса е индикатор за прогресираща мускулна умора.

3. Индекс на автономна регулация (Autonomic Regulation Index, ARI)

Автономната регулация на сърдечния ритъм се оценява чрез показатели за вариабилност на сърдечната честота (HRV). Един примерен индекс е съотношението между ниско- и високочестотната компонента на спектъра:

$$ARI = \frac{P_{LF}}{P_{HF}} \quad (4.7)$$

Където:

P_{LF} и P_{HF} са спектралните мощности в нискочестотния и високочестотния диапазон. Повишените стойности на ARI се интерпретират като доминиране на симпатиковата активност, характерно за стресови и екстремни условия.

4. Интегрален индекс на функционално състояние (Integral Functional State Index, IFSI)

За комплексна оценка на състоянието на оператора се дефинира интегрален индекс, който обединява няколко частични индекса:

$$IFSI = \alpha \cdot PLI + \beta \cdot MFI + \gamma \cdot ARI \quad (4.8)$$

където α , β и γ са нормализирани коефициенти, определени експертно или чрез статистическа оптимизация. Индексът IFSI предоставя едномерна количествена оценка на функционалното състояние и може да се използва за задаване на прагове за предупреждение и критични режими.

4.5. Адаптивни и персонализирани модели

В софтуерната реализация формализираните индекси могат да бъдат допълнително адаптирани чрез индивидуални калибрационни процедури и модели за машинно обучение. В този случай интегралният индекс може да бъде представен в обобщен вид:

$$IFSI = f(X, \theta) \quad (4.9)$$

Където: X е векторът на извлечените физиологични характеристики, а θ е набор от индивидуални параметри, обучени на база експериментални данни от конкретния оператор.

Формализирането на физиологичните индекси и въвеждането на ясни математични зависимости осигуряват обективност, възпроизводимост и възможност за автоматизация на анализа на физиологичните данни в екстремни условия. Това позволява ефективна интеграция на софтуерните средства в системи за ранно предупреждение, адаптивно управление и повишаване на безопасността на пилоти, космонавти и водолази.

Използват се линейни и нелинейни модели, експертно зададени теглови коефициенти, както и методи на статистическо моделиране и машинно обучение, позволяващи персонализирана оценка и адаптация към конкретните условия на експлоатация.

Въз основа на описаната архитектура и формализираните интегрални индекси, в настоящия подраздел е представена примерна конфигурация на софтуерните средства за анализ и визуализация, илюстрираща практическа реализация на алгоритмите, потребителския интерфейс и областите на приложение.



Фиг. 5. Примерна конфигурация за обработка на физиологичните сигнали

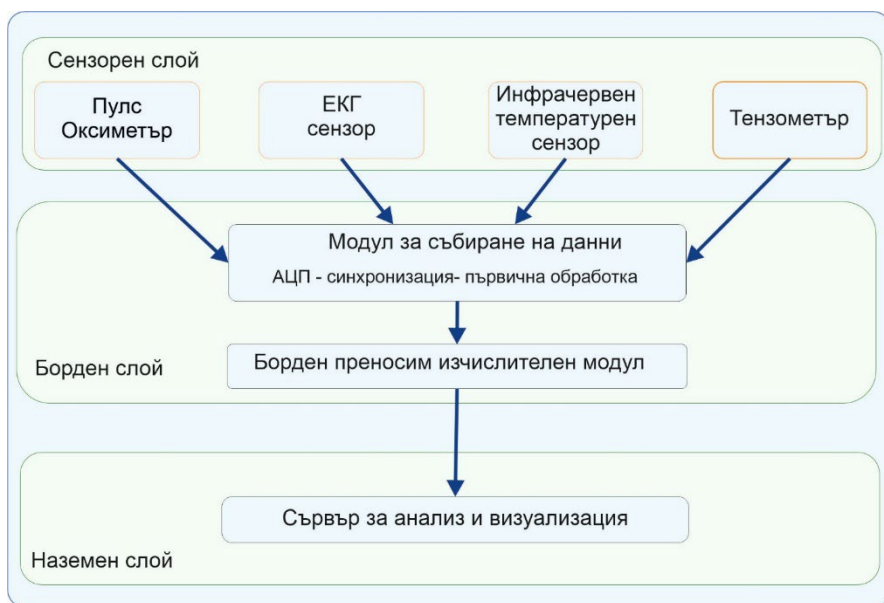
В примерната конфигурация за обработка на физиологичните сигнали се използва комбинация от спектрални, времево-честотни и интелигентни методи. Спектралният анализ се реализира чрез бързо преобразоване на Фурие (FFT), докато

вълновото (wavelet) преобразование се прилага за анализ на нестационарни и преходни процеси. За класификация и оценка на функционалните състояния се използват модели на машинно обучение, позволяващи адаптивна и персонализирана оценка.

Потребителският интерфейс е реализиран под формата на графичен панел с визуализация на текущите физиологични параметри и интегрални индекси. Предвидени са алармени състояния с различни нива на приоритет, които се активират при превишаване на предварително зададени или адаптивни прагови стойности.

Описаната примерна конфигурация е приложима в различни експлоатационни режими, включително обучение и тренажорни системи, мониторинг по време на реални мисии, както и в рамките на медицински контрол и функционална диагностика.

Съществен компонент на софтуерните средства е модулът за визуализация и човеко–машинен интерфейс, чиято цел е представяне на резултатите в ясна, нагледна и ергономично оптимизирана форма. Визуализацията включва както детайлно представяне на отделни физиологични сигнали, така и обобщени индикатори и алармени съобщения, предназначени за бърза интерпретация от оператора или от наземен/борден медицински персонал. Особено внимание се отделя на минимизиране на когнитивното натоварване и на възможността за интеграция със съществуващи системи за управление и безопасност в авиационни, космически и подводни платформи.



Фиг. 6. Архитектура на система за физиологичен мониторинг на оператори, работещи в екстремни условия (пилоти, космонавти и водолази)

В обобщение, софтуерният слой за анализ и визуализация представлява критичен елемент от системите за физиологичен мониторинг в екстремни условия, като осигурява надеждна обработка на биосигналите, извличане на диагностично значима информация и ефективното ѝ представяне за подпомагане на навременни и обосновани решения. Неговата функционалност пряко влияе върху безопасността, ефективността и дългосрочното здраве на операторите в условия на повишен физиологичен и психоемоционален стрес.

4.6. Системи за работа в реално време

Реалновремевите системи за анализ и визуализация на физиологични параметри са проектирани с цел осигуряване на минимално времезакъснение между процесите на измерване,

обработка и оценка на функционалното състояние на оператора. Това свойство е от критично значение при работа в екстремни условия, при които физиологичното състояние може да се промени внезапно и да доведе до повишен риск за безопасността на оператора и за изпълнението на мисията.

Функционалната архитектура на реалновремевия софтуерен слой (фиг. 7) гарантира непрекъснат поток на данни от сензорния слой към модулите за цифрова обработка, извличане на характеристики и изчисляване на интегрални индекси.

Алгоритмите са оптимизирани така, че да осигуряват детерминирано време за изпълнение и предсказуемо поведение на системата, което позволява своевременно откриване на критични отклонения от нормалното физиологично състояние.



Фиг. 7. Функционалната архитектура на реалновремевия софтуерен слой

Съществен елемент на реалновремевата функционалност е управлението на латентността, което включва оптимизация на изчислителните ресурси, приоритизация на задачите и ефективна обработка на многоканални сигнали. Това позволява изчисляването на физиологични показатели и интегрални индекси в рамките на времеви прозорци, съвместими с динамиката на наблюдаваните физиологични процеси. В резултат системата е способна да реагира адекватно както на бързи преходни състояния, така и на постепенно натрупващи се признаци на умора или функционално изчерпване.

Реалновремевият режим на работа осигурява възможност за непрекъсната визуализация на текущите физиологични параметри и за автоматично генериране на алармени съобщения при превишаване на предварително зададени или адаптивни прагове. По

този начин се създават условия за ранно предупреждение и навременна намеса, което е особено важно при оператори като пилоти, космонавти и водолази, при които времето за реакция често е строго ограничено.

Допълнително предимство на реалновремевите системи е възможността за адаптивна настройка на алгоритмите въз основа на текущото физиологично състояние и индивидуалните характеристики на оператора. Това позволява динамично коригиране на праговите стойности, тегловите коефициенти на интегралните индекси и параметрите на визуализацията с цел повишаване на чувствителността и надеждността на оценката.

В обобщение, реалновремевите софтуерни средства за анализ и визуализация представляват ключов функционален компонент на системите за физиологичен мониторинг в екстремни условия. Те осигуряват минимална латентност, висока надеждност и възможност за своевременно вземане на решения, като по този начин допринасят пряко за повишаване на безопасността, ефективността и устойчивостта на човешката дейност в условия на повишено физиологично и психоемоционално натоварване.

ГЛАВА 5

АПАРАТУРИ ЗА ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧЕН МОНИТОРИНГ НА ОПЕРАТОРИ В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ

5.1. ССОД „ЗОРА“ – концепция, архитектура и приложения

5.1.1. *Обща концепция*

Специализираната система за обработка на данни (ССОД) „Зора“ представлява българска интегрирана хардуерно-софтуерна платформа, разработена за провеждане на комплексни психо-физиологични експерименти в космически условия, включително екстремни високонатоварени среди. Основната концепция на системата е централизирано събиране, цифрова обработка, визуализация и дългосрочно съхранение на многоканални биомедицински и кинематични данни в реално време, при висока надеждност и устойчивост на външни въздействия.

ССОД „Зора“ е разработена през 1989 г. в рамките на българската космическа програма като част от научноизследователските задачи, заложи за втория български космически полет по програмата „Шипка“. Системата е предназначена за продължителна експлоатация в орбитални условия и е интегрирана на борда на орбиталната станция „Мир“, където функционира в периода от 1989 до 1994 г. Нейното използване в реална космическа среда представлява едно от най-значимите постижения на българската научно-техническа школа в областта на космическата медицина и биомедицинското приборостроене.

По време на експлоатацията си на станцията „Мир“, ССОД „Зора“ е използвана от руския лекар космонавт Валерий Поляков за провеждане на серия дългосрочни психо-физиологични и функционални експерименти, свързани с адаптацията на човешкия организъм към микрогравитация и продължително пребиваване в орбита. В рамките на рекордните 245 денонощия непрекъснат

престой на Поляков на борда на станцията системата осигурява надеждна регистрация и анализ на параметри, отразяващи зрительно-двигателната координация, мускулната активност, стабилността на позата и когнитивната натовареност на оператора.

Получените експериментални данни имат съществен принос за разширяване на познанията относно физиологичните механизми на адаптация и умора при продължителни космически мисии и потвърждават високото ниво на инженерна реализация и функционална адекватност на ССОД „Зора“. Този успешен дългосрочен орбитален експеримент утвърждава системата като надеждна платформа не само за космически изследвания, но и като основа за последващи разработки, насочени към изследване на оператори в екстремни и изолирани условия на Земята. Блоквата схема на ССОД „ЗОРА“ е показана на фиг. 8.

ССОД „Зора“ е проектирана с модулна архитектура, позволяваща едновременното изпълнение на няколко експериментални протокола, като:

- психо-физиологични тестове (реакционно време, свободно време);
- двигателни и силови експерименти;
- електрофизиологични измервания (ЕОГ, ЕМГ);
- стабилметрични и координатни анализи.

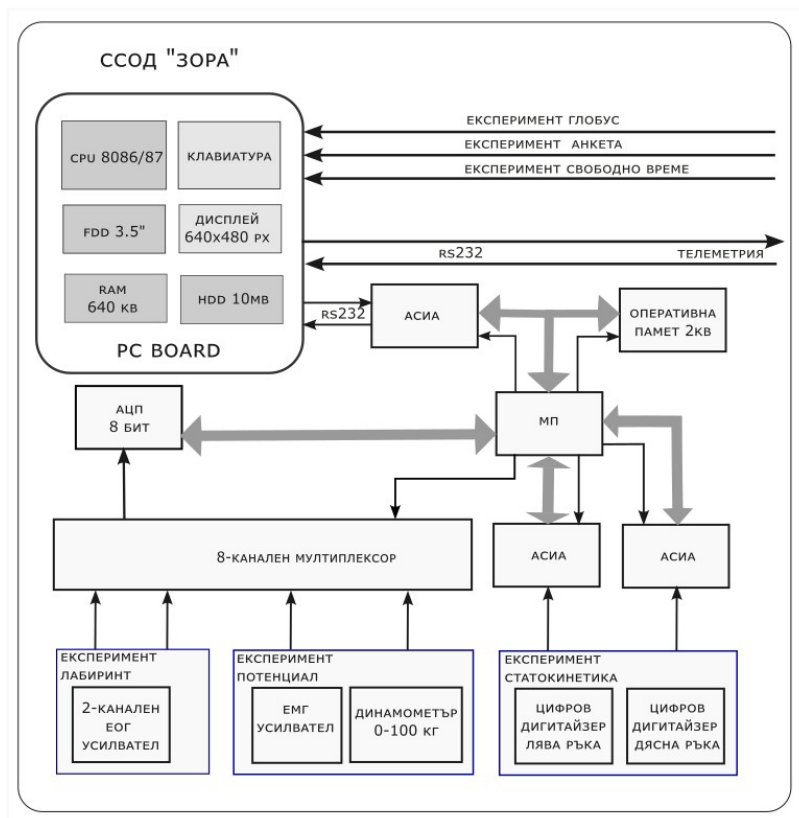
5.1.2. Архитектура на системата

Архитектурата на ССОД „Зора“ е изградена на принципа на двустепенна структура, включваща централен изчислителен комплекс и специализирани периферни измервателни модули.

Централен изчислителен комплекс

В основата на системата стои компютърен модул, базиран на процесор 8086/8087, който осигурява:

- управление на експериментите;
- визуализация на резултатите;
- операторски интерфейс;
- съхранение на данни.



Фиг. 8. Блоквата схем на ССОД „ЗОРА“

Комплексът включва:

- оперативна памет (640 kB);
- твърд диск с капацитет 10 MB;
- флопидисково устройство 3.5";
- плазмен дисплей с резолюция 640×480 px;
- клавиатура за управление и въвеждане на параметри.

Комуникацията с външните измервателни модули и телеметричните канали се осъществява чрез стандартния сериен интерфейс RS-232, което осигурява висока надеждност и

електромагнитна устойчивост – критично изискване за екстремни условия.

Измервателно-управляващ подсистемен модул

Специализираният измервателен модул е реализиран около микропроцесор (МП 6800), подпомаган от:

- асинхронни серийни интерфейсни адаптери (АСИА);
- оперативна памет с обем 8 kB;
- 8-битов аналогово-цифров преобразувател (АЦП);
- 8-канален аналогов мултиплексор.

Тази структура позволява последователно сканиране на до осем аналогови канала, като цифровите данни се обработват локално от микропроцесора и се предават към централния компютър или се записват за последващ анализ.

5.1.3. Експериментални модули и сензорни системи

ССОД „Зора“ поддържа разнообразие от специализирани експериментални блокове, включително:

- *Експеримент Лабиринт*
Използва двуканален ЕОГ усилвател за регистриране на движенията на очите, приложим при изследване на зрительно-моторна координация и когнитивно натоварване.
- *Експеримент „Потенциал“*
Включва ЕМГ усилвател и динамометър (0–100 kg) за анализ на мускулната инервация, силови характеристики и мускулна умора.
- *Експеримент Статокинетика*
Реализиран чрез два независими цифрови дигитайзера за лява и дясна ръка, позволяващи оценка на координацията, симетрията и фината моторика в условия на микрогравитация.
- *Самооценка*
„Анкета“ и „Свободно време“, управлявани от централния компютър и синхронизирани с физиологичните измервания.
- *Информация*

Приложение „Глобус“ показва на екрана на главния компютър влизането на станцията в зона на радиовръзка с ЦУП (Център за управление на полета).

5.1.4. Приложения в космически и екстремни условия

Благодарение на своята модулна архитектура, устойчиви комуникационни интерфейси и възможност за синхронна и паралелна регистрация на множество физиологични параметри, системата за събиране и обработка на данни (ССОД) „Зора“ намира широко приложение в научни и приложни изследвания, насочени към човешката дейност в екстремни условия. Системата позволява гъвкава конфигурация в зависимост от конкретната изследователска задача и осигурява надежден запис на биосигнали в динамична и потенциално агресивна среда.

В този контекст „Зора“ се използва при подготовката и подбора на пилоти и космонавти, където се изисква комплексна оценка на функционалното състояние, устойчивостта на натоварване и индивидуалните компенсаторни механизми на организма.



Фиг. 9. Апаратура ССОД „ЗОРА“ – система за психофизиологичен мониторинг на космонавти

Системата е приложима и при изследване на оператори в условия на сензорна депривация, информационно пренасищане или свръхнатоварване, като предоставя обективни данни за динамиката на физиологичните реакции и адаптационните процеси.

Особено значима е ролята ѝ в анализа на инервацията на мускулите и мускулната умора, координация и моторен контрол при продължителни мисии, както и в експериментални модели, свързани с адаптацията на човека към екстремна среда.

ССОД „Зора“ представлява съществен етап в развитието на българските специализирани изчислителни и измервателни платформи, ориентирани към космическа медицина, ергономия и физиология на екстремния труд. Нейният принос се изразява не само в технологичната реализация, но и в създаването на методологична основа за комплексен, мултипараметричен анализ на човешкото състояние в реални космически и експериментални наземни условия.



Фиг.10. Предполетни дейности преди качването на ССОД „Зора“ на борда на станция „МИР“

а) Подготовка на космонавта Володя Соловьев за изпълнение на експеримент „Потенциал“

б) Последни проверки на ССОД „ЗОРА“

в) Подготовка на космонавта Александър Александров за изпълнение на експеримент „Лабиринт“

Опитът, натрупан при разработването и дългосрочната експлоатация на ССОД „Зора“ в орбитални условия, ясно очертава както възможностите, така и ограниченията на ранните интегрирани системи за психо-физиологичен мониторинг. Макар „Зора“ да демонстрира висока надеждност и функционална адекватност при регистрацията на ключови физиологични и сензомоторни параметри, експерименталната практика показва необходимост от по-дълбок анализ на когнитивните процеси, централната нервна регулация и психоемоционалното състояние на оператора в условия на продължително натоварване.

Тази необходимост наложи преход от системи, ориентирани предимно към регистрация и визуализация на сигнали, към експериментални платформи, способни да интегрират измерването, управлението на въздействията и анализа на операторската дейност в единен методичен контекст. Именно в този научен и инженерен контекст възниква апаратурата NEUROLAB-B.

5.2. НЕВРОЛАБ-Б (NEUROLAB-B) – методични и инженерни решения

5.2.1. Предназначение и място на NEUROLAB-B в изследователския процес

Апаратурната система NEUROLAB-B е разработена като комплексна изследователска платформа за регистрация, обработка и анализ на физиологични и психо-физиологични показатели на човека оператор, специално предназначена за изследване на космонавти в условия на микрогравитация, при строго контролирани експериментални въздействия. Нейното предназначение се определя от необходимостта от синхронно измерване на множество физиологични параметри, обединени в единна методична рамка, която позволява обективно изследване на функционалното състояние, адаптационните реакции и психо-физиологичните механизми при различни режими на натоварване.

Системата разполага с вграден допълнителен стресор, реализиран чрез специализирана програма „Пилот“, която представлява симулация на ръчно скачване на транспортен космически кораб с орбитална станция. Тази програма създава условия за целенасочено индуциране на операторски, когнитивен и емоционален стрес, характерен за реални космически мисии, като същевременно осигурява възможност за прецизна оценка на психофизиологичните реакции и адаптационните механизми на космонавтите в среда на микрогравитация.

Мястото на NEUROLAB-B в изследователския процес се формира на пресечната точка между експерименталната физиология, психофизиологията и инженерното осигуряване на измерванията. Системата не се ограничава до функцията на регистратор на биофизиологични сигнали, а реализира концепцията за интегрирана експериментална среда, в която процесите на регистрация, предварителна обработка, визуализация, архивиране и управление на въздействията са обединени в единна архитектура.

В рамките на изследователския цикъл NEUROLAB-B заема централно място в етапите на експерименталната реализация и обективната оценка на състоянието на човека оператор. Системата позволява реализиране на експериментални протоколи, при които физиологичните и психо-физиологичните реакции се регистрират синхронно както при прилагане на контролирани стимули, така и при изпълнение на операторски задачи. Това създава предпоставки за анализ на причинно-следствените връзки между външните въздействия, функционалните изменения в организма и поведенческите реакции на оператора.

Методичното предназначение на NEUROLAB-B е тясно свързано с осигуряване на висока възпроизводимост и съпоставимост на експерименталните данни. Модулната структура на системата позволява стандартизиране на измервателните канали, условията на регистрация и експерименталните режими, което е от съществено значение при дългосрочни изследвания и при сравнителен анализ на резултати, получени от различни групи изследвани лица или при различни натоварвания. По този начин системата подпомага изграждането на надеждни бази данни и създава предпоставки за коректен статистически и интерпретационен анализ.

От инженерна гледна точка NEUROLAB-B е позиционирана като междинно звено между сензорните технологии и аналитичните методи за оценка на психо-физиологичното състояние. Системата осигурява необходимата инфраструктура за интеграция на хетерогенни сензорни модули, времева синхронизация на данните и предварителна обработка на сигналите, като по този начин създава условия за прилагане на по-сложни аналитични и интерпретационни подходи на по-високо ниво.

В контекста на изследванията в авиационната и космическата медицина, както и при изучаване на оператори, работещи в други екстремни среди, NEUROLAB-B изпълнява ролята на експериментален инструмент за изследване на границите на адаптацията и надеждността на човека като елемент от системата „човек машина“. Чрез възможността за комбиниране на кардиоваскуларни, неврофизиологични, мускулни и автономни показатели, системата предоставя цялостен и динамичен поглед върху функционалното състояние на оператора.

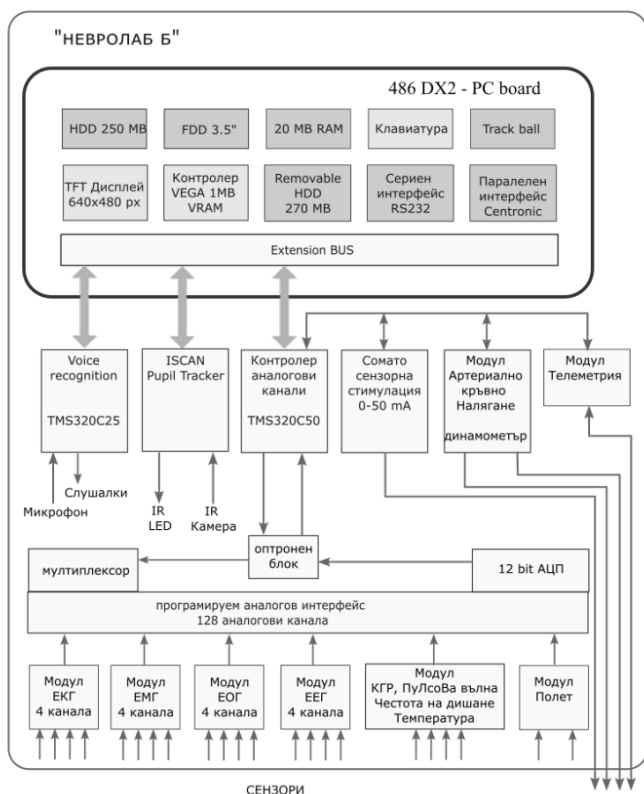
По този начин NEUROLAB-B заема устойчиво и ясно дефинирано място в изследователския процес като универсална платформа за експериментални изследвания, която обединява методичните изисквания на физиологията и психофизиологията с инженерните решения за надежден, синхронен и възпроизводим сбор и обработка на данни.

5.2.2. Архитектурни принципи и модулна организация на NEUROLAB-B

Архитектурата на апаратурната система NEUROLAB-B е изградена в съответствие с принципите на модулност, функционално разделение и мащабируемост, които осигуряват висока гъвкавост при конфигуриране на системата и нейната адаптация към различни експериментални и изследователски задачи. Този архитектурен подход позволява използването на системата както в лабораторни условия, така и в реални експериментални среди, включително специфични операторски ситуации, без нарушаване на целостта на измервателния процес и възпроизводимостта на резултатите.

Основен архитектурен принцип при NEUROLAB-B е йерархичното разделение на функциите, реализирано чрез ясно

разграничени нива на управление, обработка и измерване, както е показано в блоковата схема на системата на фиг.11.



Фиг. 11. Блокова схема на Невролаб-Б

В горното архитектурно ниво е разположен централният изчислителен и управляващ модул, реализиран на база персонален компютър от клас 486 DX2, който изпълнява функциите по управление на експерименталния процес, визуализация на регистрираните сигнали в реално време, реализация на операторския интерфейс и архивиране на експерименталните данни.

Централният компютърен модул е свързан със специализираните функционални блокове чрез разширителна

системна шина (Extension BUS), която представлява основната комуникационна среда на системата. Чрез тази шина се осъществява обмен на данни и управляващи сигнали между централния модул и периферните подсистеми, включително модулите за разпознаване на реч, управление на аналоговите канали, регистрация на окуломоторни реакции, телеметрия и други функционални блокове, представени в блоковата схема (Памукова-Майкълсън, Р. 2024). Архитектурата на шината позволява гъвкаво включване и изключване на модули в зависимост от конкретния експериментален протокол.

На следващо архитектурно ниво са разположени специализираните управляващи и обработващи модули, реализирани с цифрови сигнални процесори от серията TMS320. Те включват контролер на аналоговите канали, модул за разпознаване на реч (Speech Recognition) и интерфейси към външни измервателни системи, в това число Pupil Tracker на ISCAN. Тези модули осъществяват предварителна цифрова обработка на сигналите, управление на режимите на измерване и времева синхронизация на данните, като по този начин разтоварват централния компютърен модул и осигуряват детерминирана работа в реално време.

Съществен методичен елемент в архитектурата на NEUROLAB-B е използването на речево управление на експерименталните процедури чрез модула Speech Recognition, както и управлението на курсора и графичния интерфейс посредством Pupil Tracker. Това архитектурно решение е въведено с цел минимизиране на моторните артефакти в регистрираните физиологични сигнали, които биха възникнали при използване на стандартни входни устройства като клавиатура и мишка. По този начин се осигурява по-висока чистота и надеждност на регистрираните биосигнали, особено при измервания на ЕЕГ, ЕОГ и ЕМГ в условия на повишено когнитивно и сензомоторно натоварване.

Използването на речеви команди предоставя и допълнително методично предимство, като позволява провеждане на експерименталните процедури на родния език на оператора. Това се реализира чрез обучаваща програма за разпознаване на реч, която адаптира системата към индивидуалните акустични и лингвистични характеристики на всеки оператор. По този начин се намалява

когнитивното натоварване, свързано с използването на чуждоезиков интерфейс, и се осигуряват по-естествени условия за взаимодействие със системата, което е от особено значение при продължителни експерименти и при изследвания в екстремни операторски среди, включително условия на микрогравитация.

Измервателната част на NEUROLAB-B е организирана в долното архитектурно ниво, където е реализиран програмируем аналогов интерфейс с възможност за управление на до 128 аналогови канала с програмируемо усилване.

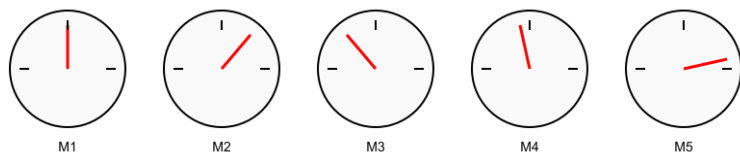
В космическия вариант на апаратурата броя на каналите е ограничен до 48. Този интерфейс включва многоканален мултиплексор, 12-битов сериен високоскоростен аналогово-цифров преобразувател и оптронен блок за галванична изолация, което осигурява унифициран вход за различните сензорни модули и гарантира електрическа безопасност при директен контакт с човека оператор.

Към аналоговия интерфейс са свързани самостоятелни сензорни и измервателни модули, реализирани като отделни функционални блокове. Системата осигурява регистрация на следните физиологични и психо-физиологични параметри: електрокардиограма (ЕКГ), електроокулограма (ЕОГ), електромиограма (ЕМГ), електроенцефалограма (ЕЕГ), кожно-галванична реакция, периферна температура, честота на дишане, артериално кръвно налягане, динамометрия, както и соматосензорна стимулация. Модулната организация позволява независима настройка и оптимизация на всеки измервателен канал и минимизира кръстосаните смущения между сигналите.

Регистрацията на физиологичните параметри се осъществява на фона на контролирани когнитивни, ментални и сензомоторни задачи. В тази връзка в системата е интегриран специализиран модул „Пилот“, представляващ хардуерен блок с два стандартно използвани в реални условия джойстици и програма за симулация на ръчно скачване на транспортен космически кораб със станцията.

Програмата осигурява количествена оценка на операторската дейност чрез показатели за време на изпълнение и качество на управление, като същевременно функционира като мощен психо-физиологичен стресор. Допълнително могат да се

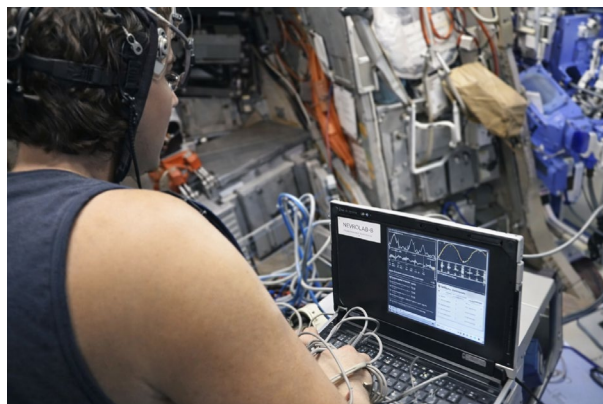
използват когнитивни тестове от типа „манометри“ или „компаси“ (фиг. 12), които позволяват изследване на вниманието, пространствената ориентация и когнитивния контрол.



Фиг. 12. Когнитивен тест Манометри

В обобщение, архитектурните решения и модулната организация на NEUROLAB-B, ясно отразени в блоковата схема на системата, създават стабилна, разширяема и методично прозрачна основа за комплексни психо-физиологични изследвания на човека оператор.

Системата съчетава висока измервателна точност, синхронност на данните и адаптивност към разнообразни експериментални сценарии, което я утвърждава като универсална платформа за мониторинг и анализ на операторска дейност в условия на повишено натоварване, включително в контекста на космически мисии.



Фиг. 13. Провеждане на експеримент с апаратурата Невролаб-Б в условия на микрогравитация – космическа станция „Мир“

В контекста на психо-физиологичните изследвания на човека оператор внедряването на речево управление и поглед-базирано взаимодействие в системата NEUROLAB-B има не само техническо, но и съществено методично и ергономично значение. Възможността за управление на експерименталните процедури чрез речеви команди на родния език на оператора, реализирана посредством обучаваща програма за разпознаване на реч, допринася за снижаване на допълнителното когнитивно и емоционално натоварване, свързано с интерфейсни ограничения и езикови бариери.

Намаляването на необходимостта от фини моторни действия и от превключване на вниманието между изпълнението на основната задача и управлението на експеримента води до редуциране на психо-физиологичния стрес, което се проявява в по-стабилни показатели на автономната нервна система и по-ниска вариабилност в регистрираните биосигнали. Това създава предпоставки за по-точно и възпроизводимо измерване на физиологичните реакции, особено при продължителни експерименти и при високи нива на операторско натоварване.

От гледна точка на надеждността на операторската дейност, описаните архитектурни и интерфейсни решения способстват за повишаване на устойчивостта на изпълнение, намаляване на вероятността от грешки и по-добро запазване на функционалното състояние във времето. Това е от особена значимост при изследвания, свързани със сензомоторни задачи с висока отговорност, като симулацията на ръчно скачване на космически кораб със станция в програмата „Полет“, където времето за реакция и качеството на управление са критични показатели.

В този смисъл интеграцията на речево управление и окуломоторен контрол в НЕВРОЛАБ-Б следва да се разглежда като целенасочено средство за повишаване на екологичната валидност на експериментите, приближавайки условията на лабораторно изследване до реалните операторски ситуации. Това утвърждава системата не само като измервателна платформа, но и като инструмент за комплексна оценка на адаптационните възможности и надеждността на човека оператор в условия на повишено психо-физиологично натоварване, включително в контекста на космически мисии и микрогравитационна среда.

В сравнителен план архитектурните и методичните решения, реализирани в НЕВРОЛАБ-Б, могат да бъдат разгледани в контекста на развитието на аналогични психо-физиологични системи, използвани както в съветската, така и в западната школа за изследване на човека оператор в авиацията и космонавтиката.

Съветските системи за психо-физиологичен контрол на космонавти традиционно се характеризират с висока степен на специализация и ориентация към регистрация на ограничен набор от ключови физиологични показатели, като ЕКГ, ЕЕГ и вегетативни реакции, често интегрирани в бордови или полубордови комплекси. Тези системи са оптимизирани за надеждност и устойчивост в реални полетни условия, но в много случаи са с ограничени възможности за гъвкава реконфигурация, разширяване на каналния обхват и адаптация към разнообразни експериментални протоколи. Управлението на експериментите обикновено се осъществява чрез стандартни операторски интерфейси, което предполага наличие на допълнително моторно натоварване и потенциални източници на артефакти в регистрираните сигнали.

Западните изследователски платформи, разработвани основно в рамките на космическите и авиационните програми на САЩ и Западна Европа, демонстрират висока степен на автоматизация, мощни средства за цифрова обработка и акцент върху софтуерно ориентирани решения. Те често използват модулен принцип, но в много случаи са фокусирани върху изолирани функционални подсистеми (например EEG monitoring, eye tracking или workload assessment), които невинаги са интегрирани в единна хардуерно-методична рамка. Освен това управлението на експерименталните процедури обикновено се осъществява чрез визуални и мануални интерфейси, което може да повиши когнитивното и моторното натоварване при сложни операторски задачи.



а) Работна конфигурация



б) Транспортна конфигурация

Фиг. 14. *Общ изглед на апаратурата Невролаб-Б*



*Фиг. 15. Невролаб-2000 щатен работен вариант
в руския отсек на МКС*

В този смисъл NEUROLAB-B заема междинна, но концептуално напреднала позиция между високоспециализираните, но по-слабо гъвкави съветски системи, и софтуерно ориентирани западни платформи, като предлага хардуерно-методична цялостност, висока канална плътност и ориентация към операторската надеждност.

Това я утвърждава като самостоятелна и оригинална изследователска платформа, насочена не само към мониторинг, но и към задълбочен анализ на адаптационните механизми и надеждността на човека оператор в условия на екстремно натоварване, включително космически мисии.

Невролаб-Б има ключово значение за развитието на космическата психофизиология, тъй като за първи път осигурява възможност за дългосрочни и систематични изследвания на психофизиологичното състояние на космонавти в условията на микрогравитация на борда на орбитална станция. Натрупаният научен и експлоатационен опит при използването на Невролаб-Б на станция Мир създава необходимата основа за разработването на усъвършенствана апаратура от по-ново поколение Невролаб-2000.

Невролаб-2000 на борда на Международна космическа станция (Фиг. 15) е пряк наследник на апаратурата Невролаб-Б, като концепцията, методиката и типът регистрирани психофизиологични сигнали са запазени. Апаратурният комплекс е адаптиран към условията на МКС, нейната модулна архитектура и изискванията за дългосрочен психо-физиологичен мониторинг на екипажа.

Въпреки значимия методичен напредък, реализиран с Невролаб-Б, натрупаният експериментален материал постепенно разкрива границите на класическите лабораторни и полулабораторни парадигми. Макар системата да позволява синхронно изследване на когнитивни, сензомоторни и автономни физиологични реакции, условията на експеримента остават до известна степен структурирани и предсказуеми. Това ограничава възможността за пълно моделиране на реалната операторска дейност, при която натоварванията са едновременно физически, когнитивни и постурални, а стресът е неизбежен и трудно компенсируем. Тези ограничения водят до необходимостта от нов подход, при който експерименталната среда сама по себе си се превръща в активен стресор, а изследването се насочва не само към реакциите, но и към начина, по който операторът организира и поддържа своята дейност. Така се формира концепцията за BeON-1 като система, а не просто като усъвършенствана апаратура.

5.3. BEON-1 развитие на концепцията за мониторинг

5.3.1. Историческо развитие на концепцията за психо-физиологичен мониторинг при оператори

Концепцията за психо-физиологичен мониторинг на оператори се развива паралелно с усложняването на техническите системи и нарастващата роля на човека като ключов елемент в управлението на процеси с висока степен на риск. Още в средата на XX век става ясно, че надеждността и безопасността на сложни системи – особено в авиацията, космонавтиката и военната техника – зависят не само от техническите параметри, но и от психо-физиологичното състояние на оператора. Това поставя началото на систематични изследвания, насочени към обективна оценка на вниманието, реактивността, устойчивостта на стрес и способността за вземане на решения в динамична и често екстремна среда.

Ранните методи за психо-физиологична оценка се основават предимно на изолирани измервания на физиологични показатели (сърдечна честота, електрокардиограма, кожно-гальванична реакция), както и на психометрични тестове, провеждани извън реалния контекст на операторската дейност. Макар тези подходи да предоставят ценна информация за общото функционално състояние на изследваните лица, те имат съществени ограничения, свързани с ниска екологична валидност и слаба чувствителност към сложното взаимодействие между когнитивни процеси, поведение и физиологични реакции по време на реална работа.

В отговор на тези ограничения се появяват първите специализирани апаратурни комплекси, предназначени за интегрирана оценка на оператори. В българската научна и приложна практика значимо място заемат системите ЗОРА и Плевен-87, които въвеждат идеята за комбиниране на поведенчески задачи с контролирано натоварване и регистриране на физиологични реакции. Тези апаратури поставят началото на целенасоченото изследване на операторската дейност в условия, доближаващи се до реалните изисквания на авиационната среда, и създават предпоставки за преминаване от статична диагностика към динамична оценка на работоспособността.

Следващ ключов етап в развитието на концепцията е създаването на апаратурата Невролаб-Б. Тя представлява качествено скок в методологично отношение, тъй като интегрира многокомпонентен подход, включващ когнитивни тестове, сензомоторни реакции и физиологични показатели в рамките на единна експериментална процедура. Невролаб-Б намира широко приложение в авиационната и космическата медицина, включително в дългосрочни изследвания на летателен състав и космонавти, като демонстрира възможността за обективна оценка на психо-физиологичните ресурси на оператора при повишено натоварване. Именно тази апаратура утвърждава разбирането, че надеждната оценка не може да се базира на единичен показател, а изисква комплексен анализ на поведението и физиологичните реакции в условия на контролирана, но достатъчно сложна задача.

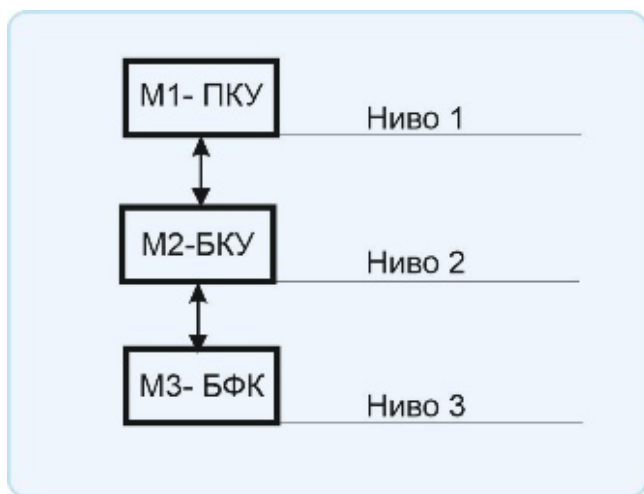
Въпреки значимите си предимства, Невролаб-Б отразява технологичното и методологичното ниво на своето време. Ограничената изчислителна мощ, по-малката гъвкавост на тестовите сценарии и по-скромната интеграция на различни физиологични канали постепенно очертават необходимостта от ново поколение системи. Натрупаният опит в авиационната и космическата медицина ясно показва, че съвременните оператори работят в условия на информационно пренасищане, бързо променящи се ситуации и комбинирано въздействие на множество стресори, което изисква по-високо ниво на инструментална и методологична адекватност.

В този контекст BeON-1 се явява логично и еволюционно продължение на утвърдената линия на развитие. Докато Невролаб-Б поставя основите на комплексния психо-физиологичен мониторинг, BeON-1 реализира тази концепция на ново технологично и методологично ниво. Преходът от по-ограничени тестови среди към мултимодална, модулна и адаптивна система отразява не просто модернизация на хардуера и софтуера, а промяна в самата философия на оценката – от регистрация на реакции към цялостен анализ на поведението и индивидуалния стил на справяне на оператора в екстремни условия.

5.3.3. ВЕОН-1 следващо поколение апаратура – концептуален скок

5.3.3.1. Концептуална рамка на ВеОН-1 – от апаратура към система

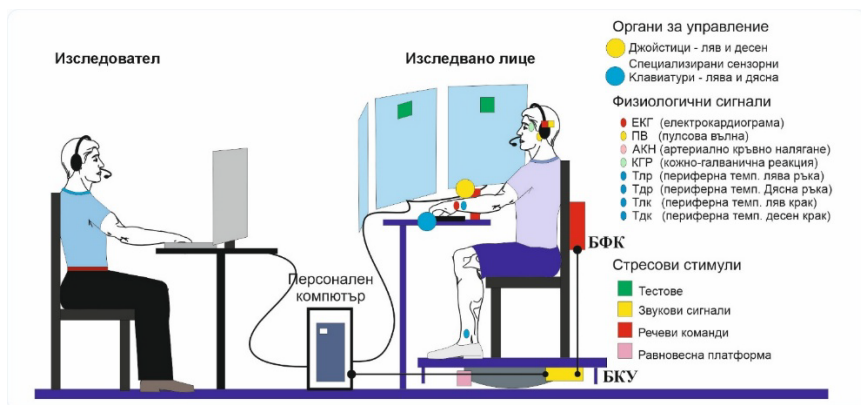
Създаването на научноизследователския комплекс ВеОН-1 представлява качествен преход в развитието на средствата за психофизиологичен мониторинг на оператори, който надхвърля рамките на класическата апаратурна модернизация. За разлика от предходните поколения системи, включително Невролаб-Б, ВеОН-1 е замислен и реализиран не като отделна измервателна апаратура, а като цялостна експериментална система, в която техническите средства, тестовите задачи и методологията за оценка са неразделно свързани в единна концептуална рамка.



Фиг. 16. Структурната схема на апаратурата ВеОН-1

Този преход ясно се илюстрира от структурната и функционалната организация на комплекса, представени на фиг. 16, фиг. 17 и фиг. 18. Структурната схема (фиг. 16) показва йерархичното изграждане на системата в три функционални нива, всяко от които изпълнява ясно дефинирана роля в процеса на изследване. За

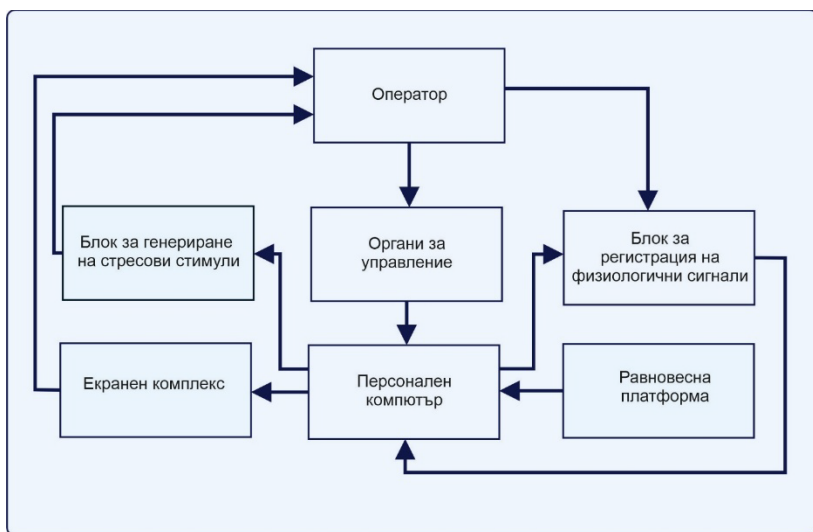
разлика от линейната логика „стимул – реакция – измерване“, характерна за по-ранните апаратури, ВеОН-1 реализира многослойна архитектура, в която управлението на експеримента, поведението на изследваното лице и физиологичните реакции се разглеждат като взаимозависими елементи на динамичен процес.



Фиг. 17. Функционална схема на ВеОН-1

Функционалната схема (фиг. 17) допълва това разбиране, като визуализира потоците от информация между отделните модули и тяхната синхронизация в реално време. Тук ясно се откроява принципът, че ВеОН-1 не е предназначен единствено да регистрира реакции, а да управлява сложна експериментална среда, в която операторът е поставен в условия на комбинирано когнитивно, сензорно и моторно натоварване. По този начин мониторингът се превръща в активен процес, интегриран в самия дизайн на задачите, а не във външно наблюдение на отделни показатели.

Концептуалният скок при ВеОН-1 се изразява и в целенасоченото ориентиране към наземно изпълнение с реалистично индуциран стрес. Вместо да разчита на симулация или на абстрактни тестови ситуации, системата създава условия, при които изследваното лице е принудено да поддържа активна постурална стабилност, да обработва големи обеми информация и да взема решения при ограничено време и ресурс.



Фиг. 18. Блокова схема на BeON-1

Тази философия на проектиране позволява да се моделират ключови характеристики на реалната операторска дейност в авиацията, космонавтиката и други екстремни среди, без да е необходимо присъствието на самата оперативна платформа.

В този смисъл BeON-1 реализира преход от оценка на отделни психо-физиологични функции към анализ на поведението като цялостен адаптационен отговор. Докато при Невролаб-Б акцентът е поставен върху надеждното измерване на реакции и физиологични параметри при зададени условия, при BeON-1 водещо става изследването на начина, по който операторът организира своята дейност в условия на информационно пренасищане и неизбежен стрес. Това позволява да се разкрият индивидуални стратегии за справяне, които не могат да бъдат идентифицирани чрез изолирани тестове или краткотрайни измервания.

Системният характер на BeON-1 се проявява и в неговата модулност. Отделните функционални нива са проектирани така, че да могат да бъдат разширявани и конфигурирани в зависимост от целите на изследването и профила на операторите. Това осигурява значително по-висока гъвкавост спрямо предходните платформи и

създава възможност за адаптиране на методологията към различни професионални групи, без да се нарушава целостта на концепцията. Така BeON-1 надгражда натрупания опит от Невролаб-Б, като го интегрира в по-широка и универсална рамка.

В обобщение, BeON-1 следва да бъде разглеждан не като усъвършенстван вариант на съществуваща апаратура, а като качествено нова концепция за психо-физиологичен мониторинг. Чрез системния си дизайн, йерархичната архитектура и ориентацията към реалистично индуцирани екстремни условия, комплексът поставя основата за нов тип изследвания, при които човекът оператор се анализира като активен, адаптиращ се елемент в сложна среда, а не като пасивен източник на измерими реакции.

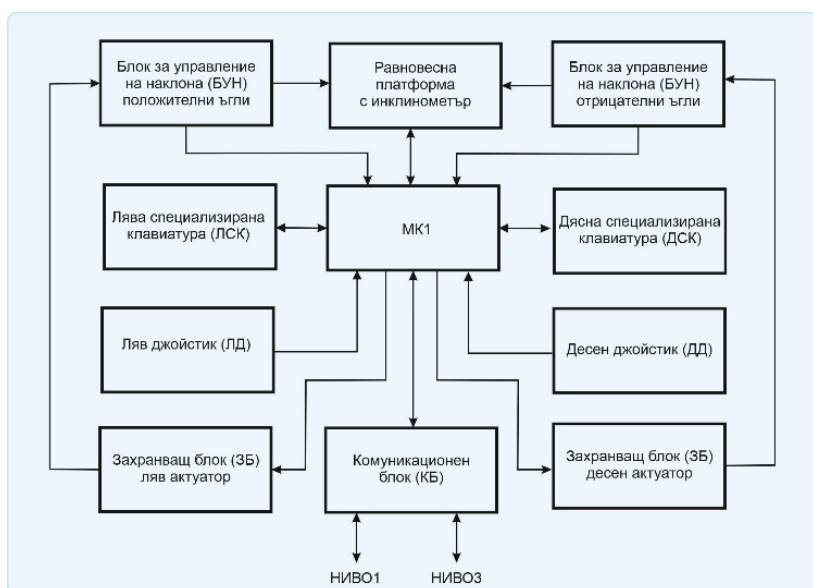
5.3.3.2. Наземно изпълнение и реалистично индуциране на стрес

Една от най-съществените концептуални разлики между BeON-1 и предходните поколения апаратура за психо-физиологичен мониторинг е целенасоченото реализиране на наземно изпълнение с реалистично индуциран стрес, което позволява изследване на операторската дейност в условия, функционално близки до реалните, без необходимост от използване на скъпи и трудно достъпни оперативни платформи. Вместо да се разчита на симулационни или изцяло когнитивни натоварвания, BeON-1 въвежда комплексен подход, при който стресът е резултат от едновременно въздействие върху постуралната стабилност, моторния контрол и когнитивната обработка на информация.

Този подход е илюстриран на фиг. 18, където е представена блокова схема на наземното изпълнение на системата и взаимодействието между отделните функционални модули.

В центъра на експерименталната конфигурация се намира изследваното лице, разположено върху нестабилна платформа, управлявана от модула за контрол. Платформата не изпълнява спомагателна или второстепенна роля, а представлява ключов елемент в методологията, тъй като създава постоянна необходимост от активен постурален контрол. По този начин още на базово ниво се въвежда неизбежен физически стресор, който не може да бъде игнориран или компенсиран чрез съзнателни стратегии.

Възможността за регулиране на ъгъла на отклонение на платформата ($\pm 6^\circ$, $\pm 12^\circ$ и $\pm 18^\circ$) позволява прецизно дозиране на постуралното натоварване и адаптирането му към целите на конкретното изследване. Управлението на платформата от контролния модул осигурява не само механично въздействие, но и синхронизация с останалите компоненти на системата. Така постуралното натоварване се превръща в динамичен фактор, който може да бъде комбиниран с различни когнитивни и сензорни задачи, вместо да се разглежда като изолиран елемент.



Фиг. 19. Блокова схема на контролния модул на BeON-1

Към постуралния компонент се добавя моторното натоварване, реализирано чрез двустранно управление с джойстици и сензорни клавиатури. Това изисква от изследваното лице непрекъсната координация между горни крайници, визуална информация и тактилна обратна връзка, при положение че стабилността на тялото не е гарантирана. Така моторната активност не е рутинна или автоматизирана, а се осъществява в условия на

постоянно нарушено равновесие, което увеличава общото натоварване върху нервната система.

Когнитивното натоварване се надгражда чрез визуални, звукови и речеви стимули, представяни в различни комбинации и с различна времева динамика. Ключов момент в концепцията на BeON-1 е, че тези стимули не се подават последователно или изолирано, а едновременно, при което информационният поток често надвишава капацитета за пълна и навременна обработка. В този контекст когнитивният стрес не произтича само от сложността на задачите, а от необходимостта за приоритизация, селекция и компромисни решения в условия на ограничени ресурси.

Взаимовръзката между постурално, моторно и когнитивно натоварване е принципно различна от класическите лабораторни парадигми. Вместо да се търси изолирано въздействие върху отделни функции, BeON-1 създава интегрирана стресова среда, в която натоварванията се усилват взаимно. Нарушената постурална стабилност увеличава когнитивната цена на моторните действия, а когнитивното пренатоварване, от своя страна, влошава контрола върху равновесието и точността на движенията. Именно тази нелинейна взаимозависимост позволява да се проявят индивидуалните различия в адаптационните механизми на операторите.

Особено важно е, че индуцираният стрес в BeON-1 е неизбежен и неконтролируем от гледна точка на изследваното лице. За разлика от тестове, при които субектът може да намали усилията или да приеме пасивна стратегия, тук поддържането на елементарна функционалност (равновесие, управление на интерфейсите, следене на стимулите) изисква непрекъсната активност. Това прави стресовото въздействие по-близко до реалните условия на операторска дейност, където отказът или прекъсването на действията често не са допустими.

В този смисъл наземното изпълнение на BeON-1 не представлява компромис спрямо реалната среда, а методологично предимство. Чрез внимателно проектирана комбинация от постурални, моторни и когнитивни фактори системата позволява възпроизвеждане на ключови характеристики на екстремните условия в контролируема и възпроизводима лабораторна обстановка. Това създава уникална възможност за систематично

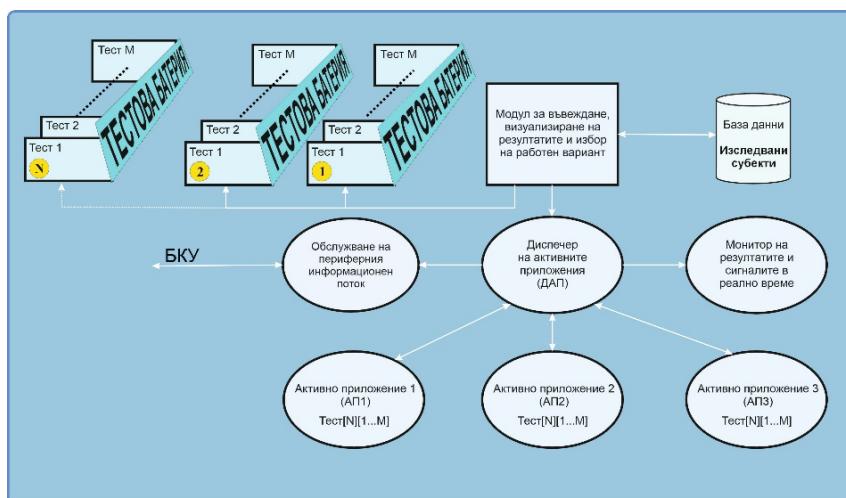
изследване на операторската устойчивост, адаптацията и индивидуалните стратегии за справяне, като същевременно осигурява висока степен на безопасност и повторяемост на експериментите.

В заключение, модулът за контрол и нестабилната платформа не са просто технически средства в BeON-1, а централни елементи на концепцията за реалистично индуциране на стрес. Чрез тях системата реализира качествен преход от абстрактно тестване към функционално моделиране на операторската дейност, при което постуралното, моторното и когнитивното натоварване формират единна, взаимосвързана стресова среда. Това поставя BeON-1 в позицията на изследователски инструмент от ново поколение, способен да разкрива дълбоки закономерности в поведението и психо-физиологичната адаптация на оператори в екстремни условия.

5.3.3.3. Мултимодална архитектура и интеграция на функционални нива

Ключовият концептуален принос на BeON-1 като система от ново поколение се проявява в неговата мултимодална архитектура, реализирана чрез ясно разграничени, но функционално интегрирани нива. За разлика от апаратурните решения, при които отделните измервателни и тестови компоненти функционират паралелно, но относително автономно, BeON-1 е проектиран като йерархична система, в която управлението, изпълнението и регистрирането на данни са подчинени на единна експериментална логика. Тази архитектура е онагледена на Фиг. 16, където централно място заема модулът *ПКУ – Програма за Контрол и Управление*.

Модул ПКУ представлява най-горното функционално ниво (ниво 1) в системата и изпълнява ролята на централен координатор на експерименталния процес. Неговата функция не се изчерпва с визуализация на данни или с управление на интерфейса, а обхваща пълния цикъл на експеримента – от конфигуриране на тестовите сценарии до синхронизирано събиране, обработка и архивиране на резултатите. Именно чрез ПКУ BeON-1 се превръща от сбор от устройства в управляема изследователска среда, в която всички процеси са времево и функционално съгласувани.



Фиг. 20. Програма за контрол и управление на BeON-1

Съществено предимство на ПКУ е възможността за гъвкава конфигурация на тестовите батерии (фиг. 20). Изследователят може да задава различни комбинации от тестове, продължителност на експерименталните сесии, време и ред на представяне на стимулите, както и включване или изключване на допълнителни въздействия като нестабилната платформа, звукови и речеви стимули. По този начин архитектурата на BeON-1 поддържа практически неограничен брой експериментални варианти, което е принципно различно от фиксирания сценарии, характерни за по-ранни системи.

Взаимодействието между ниво 1 и ниво 2 БКУ (блок за контрол и управление) осигурява връзката между когнитивните задачи и физическото въздействие върху изследваното лице. БКУ изпълнява функции по управление и контрол на изпълнителните механизми – нестабилната платформа, джойстиците и сензорните клавиатури – и осигурява обратна информация за тяхното състояние. Чрез тази връзка постуралното и моторното натоварване не са статични параметри, а динамични компоненти на експеримента, които могат да бъдат изменяни в реално време в зависимост от хода на задачите и поведението на оператора.

Интеграцията с ниво 3 – блок на физиологичните канали (БФК) – допълва мултимодалния характер на системата. На това ниво се регистрират физиологични сигнали, свързани предимно с автономната нервна система, като електрокардиограма, пулсова вълна, показатели за артериално налягане чрез метода на РТТ (pulse transit time), кожно-гальванична реакция и периферна температура. Важен аспект е, че тези сигнали се регистрират синхронно с когнитивните и моторните реакции, което позволява последващ анализ на времевите взаимовръзки между различните модалности.

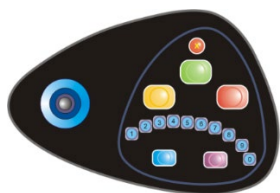
Системната интеграция между нивата 1–3 реализира качествено нов подход към психо-физиологичния мониторинг. Вместо да се търсят линейни зависимости между стимул и реакция, ВеОН-1 позволява анализ на сложни, многомерни процеси, при които физиологичните реакции, поведението и когнитивните стратегии се развиват едновременно и взаимно се влияят. Тази архитектура създава предпоставки за изследване на индивидуалния стил на справяне със стреса, като се отчита не само крайният резултат от задачите, но и динамиката на адаптацията в хода на експеримента.

Особено значение има възможността за реалновременна визуализация на всички регистрирани параметри чрез ПКУ. Изследователят разполага с информация за протичащите физиологични процеси и за изпълнението на задачите още по време на експеримента, което позволява оперативен контрол и, при необходимост, адаптиране на сценария. Това превръща ВеОН-1 в инструмент не само за последващ анализ, но и за активна експериментална работа.

В обобщение, мултимодалната архитектура на ВеОН-1 и интеграцията на функционалните нива 1–3 представляват сърцевината на концептуалния скок, реализиран от системата. Чрез централната роля на ПКУ, синхронизацията с БКУ и ВРС и възможността за гъвкава конфигурация на експерименталните условия, ВеОН-1 надхвърля традиционния апаратурен подход и се утвърждава като цялостна изследователска платформа. Именно тази архитектура прави възможно комплексното изследване на оператори в условия на комбинирано когнитивно, моторно и физиологично натоварване, характерно за реалните екстремни среди.

5.3.3.4. Когнитивни и поведенчески тестове при информационно пренасищане

Централно място в концепцията на BeON-1 заема реализирането на когнитивни и поведенчески тестове в условия на информационно пренасищане, при което обемът, разнообразието и темпът на постъпващата информация целенасочено надхвърлят възможностите за пълна и оптимална обработка. Този подход отразява реалните условия на операторска дейност в екстремни среди, където дефицитът не е на информация, а на време, внимание и когнитивни ресурси за нейното адекватно използване. В BeON-1 информационното пренасищане не се постига чрез усложняване на отделни задачи, а чрез едновременното ангажиране на няколко когнитивни канала, комбинирано с моторно и постурално натоварване.



а) лява клавиатура

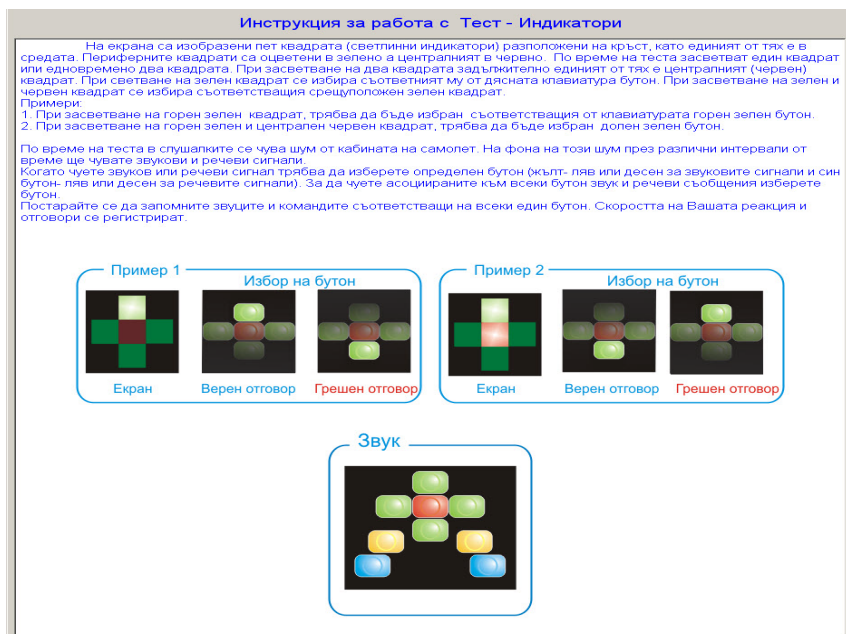


б) дясна клавиатура

Фиг. 21а,б. Специализирани сензорни клавиатури, реагиращи на докосване

Ключова роля за реализацията на този подход имат специализираните сензорни клавиатури, представени на фиг. 21а, б. Те са проектирани така, че да изискват бързи, точни и двустранно координирани моторни реакции, като същевременно минимизират възможността за вербално кодиране или стратегическо „опростяване“ на задачите. Разпределението на бутоните и необходимостта от използване на двете ръце създават условия, при които вниманието не може да бъде фокусирано върху един-единствен канал, а трябва да се разпределя динамично между визуалната информация, моторния контрол и постуралната стабилност.

Логиката на тестовете в ВеОН-1 е ясно демонстрирана чрез (фиг. 22), където е показан екранът с инструкции за работа с теста „Индикатори“.



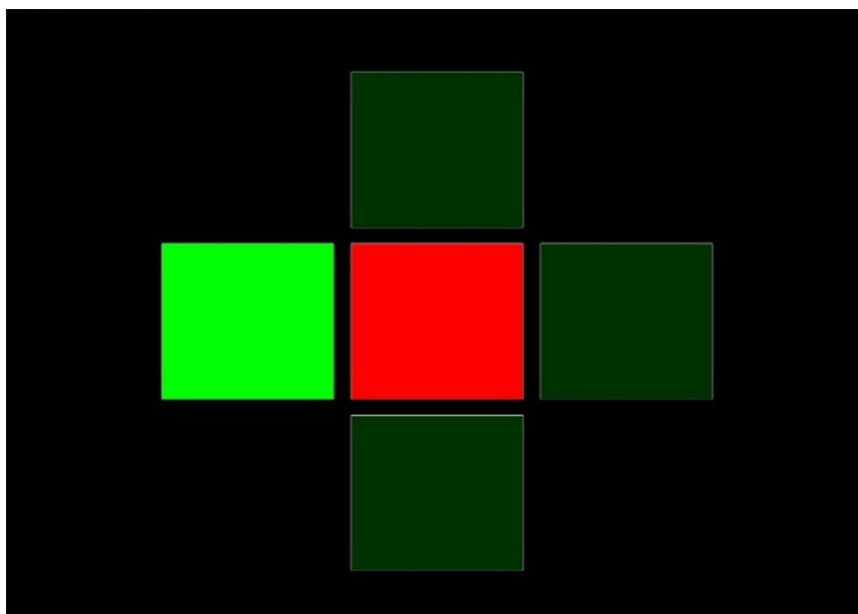
Фиг. 22. Инструкция за работа с тест „Индикатори“

Още на този етап става видно, че тестът не цели проверка на усвоени знания или на сложни интелектуални операции, а изследване на способността за бърза ориентация, селекция на релевантна информация и адекватна реакция при ясно дефинирани, но динамично променящи се правила. Инструктивният модул е интегриран в експерименталния дизайн по начин, който осигурява достатъчно разбиране на задачите, без да се допуска продължителен обучителен ефект, способен да редуцира стресовото въздействие.

Тестът „Индикатори“, илюстриран на фиг. 23, представлява един от тестовете за когнитивното натоварване в ВеОН-1. Той е структуриран в няколко компонента, които могат да се използват

самостоятелно или в комбинация, в зависимост от целите на изследването.

Първият компонент включва визуални стимули под формата на светлинни сигнали, разположени в определена пространствена конфигурация. Изследваното лице трябва не само да разпознае появата на стимула, но и да интерпретира неговото значение в контекста на зададените правила и да избере адекватна моторна реакция. В този процес се ангажират вниманието, зрительно-пространствената ориентация и скоростта на обработка на информацията.



Фиг. 23. Тест „Индикатори“

Вторият компонент на теста въвежда акустични стимули, представяни на фона на постоянен шум, характерен за авиационната среда. Това значително усложнява задачата, тъй като изисква селекция на релевантни звукови сигнали в условия на маскиране и паралелна обработка на визуална информация. Така се симулират реални ситуации, при които операторът трябва да реагира на

критични акустични сигнали, без да прекъсва текущата си визуално-моторна дейност.

Третият компонент включва речеви стимули, представени под формата на комбинации от букви, цифри и думи, които трябва да бъдат запомнени и разпознати в движение. Този елемент ангажира работната памет и механизмите за кратковременно задържане и актуализация на информацията. В условията на едновременно визуално и акустично натоварване, речевите стимули допълнително увеличават когнитивната сложност и водят до бързо изчерпване на ресурсите за контролирана обработка.

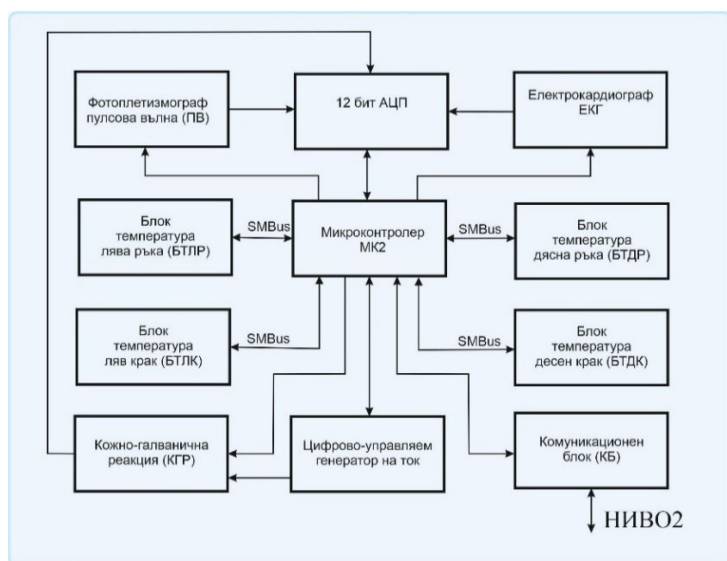
Съществен момент в методологията на BeON-1 е, че тестът „Индикатори“ и съпътстващите го задачи не са оптимизирани за максимално представяне, а за предизвикване на функционални ограничения. Информационният поток е такъв, че дори добре подготвени и мотивирани изследвани лица не могат да реагират оптимално на всички стимули. В резултат се наблюдават пропуски, забавяния и грешки, които не се разглеждат като дефект на изпълнението, а като ценен източник на информация за индивидуалния стил на справяне и приоритизация.

Комбинирането на когнитивните тестове с моторна активност и постурално натоварване превръща информационното пренасищане в многоизмерен феномен. Когнитивните грешки често са съпроводени с промени в моторната точност и в постуралната стабилност, което позволява да се анализират взаимовръзките между различните функционални нива. Този подход надхвърля традиционните когнитивни тестове, при които поведението се анализира в относително изолирана и контролирана среда.

В обобщение, когнитивните и поведенчески тестове в BeON-1, и в частност тестът „Индикатори“, са проектирани като инструмент за изследване на оператора в условия на реалистично информационно пренасищане. Чрез едновременното ангажиране на зрителни, слухови и вербални канали, съчетано с моторно и постурално натоварване, системата позволява да се разкрият границите на когнитивната обработка и индивидуалните стратегии за справяне със сложни и динамични ситуации. Това превръща BeON-1 в мощна платформа за оценка на операторската ефективност, далеч надхвърляща възможностите на класическите лабораторни тестове.

5.3.3.5. Интеграция на автономни физиологични показатели

Съществен елемент от концептуалния скок, реализиран в ВеОН-1, е пълноценната интеграция на автономни физиологични показатели като неотменна част от оценката на операторската дейност в екстремни условия. За разлика от подходи, при които физиологичните измервания служат основно за допълваща или контролна информация, в ВеОН-1 те са заложени като равноправен източник на данни, чрез който се анализират механизмите на адаптация, устойчивостта на стрес и индивидуалният стил на справяне (coping-style). Този подход е ясно илюстриран чрез фиг. 24, представяща блока на физиологичните канали (БФК – ниво 3).



Фиг. 24. Блок на физиологичните канали

БФК представляващ ниво 3 (фиг. 16) в йерархичната архитектура на системата и е проектиран с цел регистриране на физиологични сигнали, които са слабо податливи на съзнателен контрол от страна на изследваното лице. Това осигурява по-висока

обективност на оценката и минимизира влиянието на мотивационни или волеви фактори. Изборът на регистрираните показатели е подчинен на разбирането, че автономната нервна система играе ключова роля в реакцията на организма към стрес и в процесите на краткосрочна и дългосрочна адаптация.

Сред основните физиологични сигнали, регистрирани чрез БФК, е електрокардиограмата (ЕКГ), която предоставя информация както за сърдечната честота, така и за вариабилността на сърдечния ритъм. Тези показатели са широко признати като чувствителни индикатори за баланса между симпатиковата и парасимпатиковата регулация и позволяват да се проследят промените в автономния тонус в отговор на нарастващо натоварване. В контекста на BeON-1 ЕКГ данните не се анализират изолирано, а във връзка с конкретни когнитивни и моторни събития, което разкрива динамиката на физиологичния отговор по време на изпълнение на задачите.

Регистрацията на пулсовата вълна и използването на метода РТТ (закъснение на пулсовата вълна спрямо R пика на ЕКГ в определена периферна точка) за оценка на артериалното кръвно налягане при всеки сърдечен цикъл представляват допълнителен важен аспект на БФК. Този неинвазивен подход позволява непрекъснато проследяване на хемодинамичните промени, без да се нарушава естественият ход на експеримента. В условия на информационно пренасищане и комбинирано натоварване промените в РТТ отразяват както моментните реакции на стрес, така и способността на организма да поддържа относителна физиологична стабилност.

Кожно-гальваничната реакция (КГР) е друг ключов показател, включен в БФК, който отразява активността на симпатиковата нервна система и нивото на емоционална активация. КГР е особено чувствителна към внезапни и неочаквани стимули, както и към когнитивни конфликти, което я прави ценен инструмент за анализ на реакциите при информационно пренасищане. В комбинация с данните от ЕКГ и пулсовата вълна, този показател позволява да се разграничат различни модели на физиологичен отговор – например висока емоционална реактивност при относително стабилен сърдечен ритъм или обратно.

Регистрацията на периферната температура в четири точки (лява и дясна ръка, ляв и десен крак) допълва картината на

автономната регулация. Промените в периферната температура са свързани с вазомоторните реакции и предоставят информация за разпределението на кръвния поток в условия на стрес. Асиметриите между лява и дясна страна могат да бъдат индикатор за специфични адаптационни реакции или за доминиране на определени регулаторни механизми, което е от особен интерес при анализ на индивидуалния coping-style.

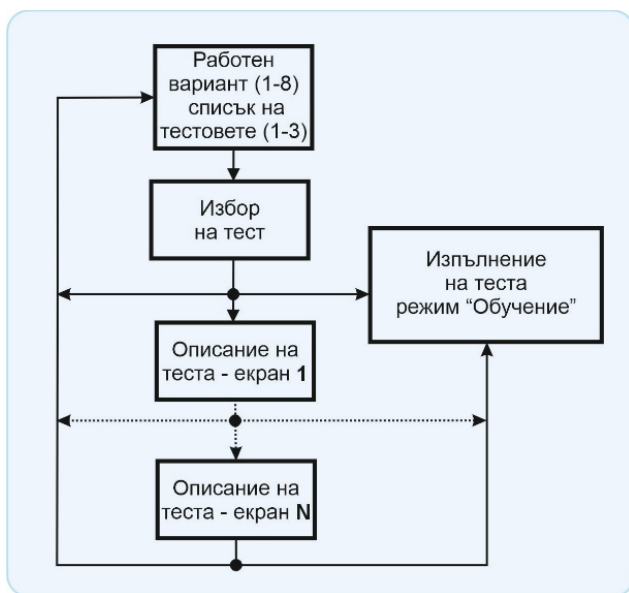
Интеграцията на тези физиологични показатели в ВеON-1 се реализира чрез синхронна регистрация и времево съгласуване с когнитивните и моторните събития, управлявани от ПКУ. Това позволява детайлен анализ на причинно-времените връзки между външните стимули, поведенческите реакции и автономните физиологични отговори. По този начин физиологичните данни не са просто фонова информация, а активен компонент в интерпретацията на поведението на оператора.

От методологична гледна точка тази интеграция създава възможност за идентифициране на индивидуални профили на адаптация. Някои оператори демонстрират ефективно поведенческо представяне при относително ниска физиологична цена, докато при други се наблюдава повишена автономна активация, съпроводена с по-бързо изчерпване на ресурсите. Анализът на тези различия позволява да се направят изводи за устойчивостта на стрес, за ефективността на стратегиите за справяне и за потенциалните рискове при продължителна работа в екстремни условия.

В обобщение, Блокът на Физиологичните Канали в ВеON-1 реализира концепцията за интегриран психо-физиологичен мониторинг на качествено ново ниво. Чрез комбинираното използване на сърдечно-съдови, електродермални и терморегулаторни показатели, синхронизирани с когнитивните и моторните задачи, системата предоставя дълбок и многопластов поглед върху адаптационните механизми на оператора. Това превръща ВеON-1 в мощен инструмент за изследване на coping-style и за обективна оценка на психо-физиологичната устойчивост в условия на реалистично индуциран стрес.

5.3.3.6. Софтуерна архитектура, модулност и фази на работа на ВеОН-1

Софтуерната архитектура на ВеОН-1 представлява ключов компонент, чрез който мултимодалната хардуерна конфигурация се превръща в функционално цялостна изследователска система. За разлика от апаратури, при които софтуерът изпълнява ограничена роля на интерфейс за управление и визуализация, при ВеОН-1 той е концептуално заложен като активен елемент на методологията. Чрез него се осъществява конфигурирането на експерименталните сценарии, синхронизацията на различните функционални нива и управлението на фазите на изследването. Основните принципи на тази архитектура са ясно илюстрирани на (фиг. 25 и фиг. 26).



Фиг. 25. Алгоритъм на процеса Обучение – Тренировка



Фиг. 26. Начален екран Обучение – Тренировка BeON-1

Софтуерната структура на BeON-1 е изградена на модулен принцип, което осигурява висока гъвкавост и възможност за адаптиране към различни изследователски цели и типове оператори. Всеки модул изпълнява строго дефинирани функции, но е проектиран така, че да може да взаимодейства с останалите модули в реално време. Това позволява едновременно управление на тестовите задачи, постуралното и моторното натоварване, както и синхронна регистрация и визуализация на физиологичните сигнали. Модулността не само улеснява разширяването на системата с нови тестове и функционалности, но и гарантира запазване на методологичната последователност при различни експериментални конфигурации.

Особено значение в софтуерната логика на BeON-1 имат две ясно разграничени фази на работа – „Тренировка“ и „Оценка“, които не следва да се разглеждат като формално разделение, а като съществен методологичен инструмент. Алгоритъмът на фазата „Тренировка“, представен на Фиг. 25, е разработен с цел да осигури минимално необходимо запознаване на изследваното лице със задачите, интерфейсите и логиката на тестовете. Тази фаза е строго

контролирана по време и съдържание и може да бъде прекъсната по всяко време от изследваното лице, което предотвратява натрупването на изразен обучителен ефект.

Съществен момент е, че фазата „Тренировка“ не цели постигане на високо ниво на изпълнение или оптимизация на стратегиите, а намаляване на неопределеността, свързана с неразбиране на инструкциите. По този начин се създават условия, при които последващата фаза „Оценка“ отразява реалните адаптационни възможности на оператора, а не ефекта от продължително упражняване. Софтуерът осигурява възможност за многократно връщане към инструктивните екрани, без това да нарушава целостта на експерименталния сценарий.

Фазата „Оценка“, която представлява същинската изследователска част, е с фиксирана продължителност и строго дефинирани параметри, зададени още при конфигурирането на експеримента. В тази фаза всички активни модули на BeON-1 функционират едновременно – когнитивните тестове, моторните интерфейси, нестабилната платформа и блокът за физиологични измервания. Софтуерът осигурява синхронна регистрация на всички събития и сигнали, като ги обвързва времево и логически с конкретните тестови задачи.

Интерфейсът за управление и наблюдение на фазата „Тренировка“, показан на Фиг. 26, демонстрира ролята на софтуера като средство за контролирана експериментална среда. Изследователят разполага с визуализация на текущото състояние на системата, активните тестове и регистрираните физиологични параметри в реално време. Това позволява не само наблюдение, но и оперативен контрол върху протичането на експеримента, без да се нарушава неговата стандартизация.

Важно методологично предимство на софтуерната архитектура на BeON-1 е стриктното разделяне между обучителната и оценъчната фаза, реализирано на програмно ниво. Това минимизира риска от смесване на обучителни ефекти с действителните показатели за операторска ефективност и адаптация. В резултат получените данни от фазата „Оценка“ могат да бъдат интерпретирани като отражение на индивидуалните психо-физиологични характеристики и стратегии за справяне, а не като продукт на предварително тренирано поведение.

В обобщение, софтуерната архитектура и модулният принцип на ВеОН-1 осигуряват методологична стабилност, гъвкавост и висока степен на контрол върху експерименталния процес. Чрез ясно дефинираните фази „Тренировка“ и „Оценка“, реализирани и управлявани софтуерно, системата създава условия за обективна и възпроизводима оценка на оператори при комбинирано когнитивно, моторно и физиологично натоварване. Това допълнително утвърждава ВеОН-1 като изследователска платформа от ново поколение, надграждаща традиционния апаратурен подход.

5.3.3.7. ВеОН-1 като качествен скок спрямо Невролаб-Б

Сравнението между ВеОН-1 и Невролаб-Б не следва да се разглежда като противопоставяне между „стара“ и „нова“ апаратура, а като анализ на естествена еволюция в развитието на концепцията за психо-физиологичен мониторинг на оператори. Невролаб-Б поставя стабилните научни и методологични основи, върху които стъпва ВеОН-1, докато последният реализира натрупания опит в значително по-широка, интегрирана и функционално ориентирана рамка. Този качествен скок е ясно видим както на концептуално, така и на системно ниво, което е обобщено чрез (Фиг. 27) представяща общия изглед и конфигурация на ВеОН-1.

На първо място, ВеОН-1 се отличава със системен характер, който надхвърля класическото разбиране за апаратура. Докато Невролаб-Б функционира предимно като комплекс за измерване и регистрация на реакции и физиологични показатели при зададени тестови условия, ВеОН-1 е проектиран като управляема изследователска среда. В него хардуерните модули, софтуерната архитектура и методологията за оценка са интегрирани в единна система, в която всеки компонент има ясно определена роля в процеса на индуциране, поддържане и анализ на натоварването.



Фиг. 27. *Общ изглед на научноизследователски комплекс ВеОН-1*

Съществен елемент на този качествен скок е наземното изпълнение с реалистично индуциран стрес, което при ВеОН-1 е заложено като централен методологичен принцип. За разлика от Невролаб-Б, при който натоварването е доминирано от когнитивни и сензомоторни задачи, ВеОН-1 въвежда постуралната нестабилност като неизбежен физически стресор. Това разширява спектъра на изследваните адаптационни механизми и позволява да се анализира поведението на оператора в условия, по-близки до реалната оперативна среда, без да се нарушава контролираната лабораторна рамка.

Друг важен аспект е мултимодалната интеграция, реализирана в ВеОН-1. Докато Невролаб-Б комбинира ограничен набор от тестове и физиологични измервания, ВеОН-1 осигурява синхронно ангажиране на когнитивни, сензорни, моторни и автономни физиологични компоненти. Както е илюстрирано на фиг. 17 и фиг. 18, тази интеграция не е добавъчна, а структурна – отделните модули са проектирани да функционират съвместно и взаимно да усилват натоварването. В резултат операторът е поставен

в условия на информационно пренасищане и функционален дефицит, при които индивидуалните стратегии за справяне се проявяват по-ясно.

По отношение на гъвкавостта и адаптивността, ВеОН-1 представлява значителен напредък спрямо Невролаб-Б. Модулната архитектура и софтуерната конфигурация позволяват бързо адаптиране на тестовите сценарии към различни професионални групи – пилоти, оператори на безпилотни системи, космически оператори и други специалисти, работещи в екстремни условия. За разлика от фиксираните тестови батерии на Невролаб-Б, ВеОН-1 предоставя възможност за изграждане на разнообразни експериментални конфигурации, без компромис с методологичната цялост.

Съществено предимство на ВеОН-1 е и по-дълбоката интеграция на автономните физиологични показатели в анализа на операторската ефективност. Докато при Невролаб-Б физиологичните измервания играят важна, но по-скоро съпътстваща роля, при ВеОН-1 те са неразделна част от интерпретацията на поведението. Синхронната регистрация и анализ на сърдечно-съдови, електродермални и терморегулаторни реакции позволяват да се оцени нивото на постигнатото поведенческо представяне и да се разграничат различни профили на адаптация и устойчивост.

Този качествен скок визуално обобщава ВеОН-1 като цялостен комплекс (Фиг. 27), в който операторът е интегриран в система от взаимносвързани технически и методологични елементи. Този образ символизира прехода от апаратура, ориентирана към измерване на отделни функции, към платформа, предназначена за комплексна оценка на човека в екстремна среда. В този смисъл ВеОН-1 не замества Невролаб-Б, а го надгражда и развива в съответствие със съвременните изисквания на авиационната, космическата и военната медицина.

В заключение, ВеОН-1 може да бъде определен като комплекс, реализиращ преход от функционално измерване към системен анализ на операторската дейност.

Чрез наземното индуциране на стрес, мултимодалната интеграция и високата степен на гъвкавост, комплексът разширява значително възможностите за обективна оценка, селекция и мониторинг на оператори в екстремни условия. Това го затвърждава

като логично и необходимо развитие на утвърдената научна линия и като основа за бъдещи изследвания и приложения.

В заключение, BeON-1 позволява задълбочен анализ на адаптационните механизми и операторската устойчивост в условия на остро- и контролирано-индуциран стрес. Въпреки това експериментите в рамките на такава платформа по своята природа са ограничени във времето и не могат да обхванат бавните, кумулативни и контекстно зависими промени във физиологичната регулация, характерни за реалната професионална дейност. Това обстоятелство насочва изследователския фокус към дълговременния автономен мониторинг, при който физиологичните реакции се регистрират в естествени условия на живот и работа.

Холтерните системи и анализът на вариационността на сърдечния ритъм допълват експерименталните платформи, като предоставят информация за циркадни ритми, хроничен стрес и адаптационен резерв, недостъпна за краткотрайни лабораторни изследвания.

5.4. Холтер системи за дълговременни измервания

Дълговременните физиологични записи заемат важно място в съвременната функционална диагностика, тъй като позволяват регистрирането на преходни, редки или контекстно зависими физиологични събития, които остават недостъпни за краткотрайните лабораторни изследвания. При оператори, работещи в екстремни условия – пилоти и космонавти – именно тези „невидими“ изменения често имат определящо значение за безопасността, надеждността на изпълняваните задачи, работоспособността и дългосрочното здраве.

Класическите диагностични методи, като стандартната електрокардиограма, кратките функционални проби и моментните измервания, предоставят единствено статична „снимка“ на физиологичното състояние на организма. За разлика от тях, холтерните системи осигуряват непрекъснат мониторинг в реални условия на живот и професионална дейност. Това дава възможност да се регистрират физиологичните реакции при физическо и психоемоционално натоварване, да се анализират циркадните

ритми, да се проследят адаптационните механизми на автономната нервна система и да се разкрие сложната връзка между външните въздействащи фактори – стрес, вибрации, шум, микрогравитация – и вътрешните регулаторни процеси.

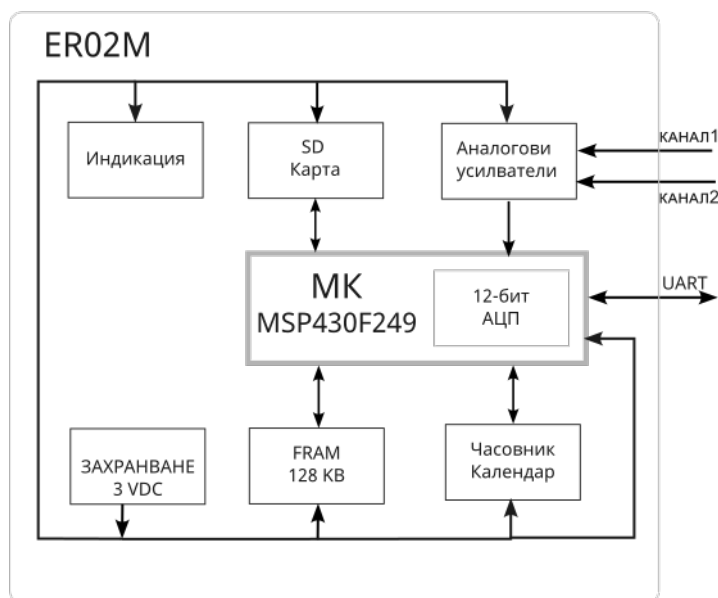
Този подход е особено ценен в авиацията и космонавтиката, където условията на работа са динамични, а последствията от физиологична декомпенсация или забавена реакция могат да бъдат критични.

Холтерът представлява малко, преносимо медицинско устройство за продължителна регистрация на физиологични сигнали, които най-често представляват електрическата активност на сърцето.

Мониторингът обикновено се извършва в рамките на 24–72 часа, като пациентът носи апарата по време на обичайните си ежедневни дейности. Чрез електроди, поставени върху кожата, електрокардиографският сигнал се записва непрекъснато в цифрова памет.

Основното предназначение на Холтер мониторинга е диагностика на преходни, интермитентни или редки нарушения на сърдечния ритъм и проводимостта, които често не се установяват при стандартно краткотрайно ЕКГ изследване в покой. След приключване на регистрацията записаните данни се подлагат на компютърен анализ със специализиран софтуер, който позволява количествена и качествена оценка на сърдечната честота, ритъмните нарушения, паузите и тяхната връзка със субективни симптоми, отбелязани от пациента. Методът е неинвазивен, безопасен и широко прилаган в съвременната клинична практика.

В авиационната практика ЕКГ холтерите намират приложение при оценка на пилоти, изпълняващи дълги полети, нощни смени и мисии с повишено психоемоционално натоварване. В условията на космически полет дълговременният ЕКГ мониторинг придобива още по-голямо значение, тъй като позволява изследване на кардиоваскуларната адаптация към микрогравитация, преразпределението на телесните течности и измененията в автономния баланс по време на мисии на борда на Международната космическа станция.



Фиг. 28. Блокова схема на 2-канален холтер за 24-часов непрекъснат запис

Съществено допълнение към сърдечно-съдовия мониторинг представляват холтерните системи за сънна апнея – компактни преносими устройства за дълговременна регистрация на дихателни паузи и хипопнеи, кислородна сатурация (SpO_2), сърдечна честота и нейната вариабилност, както и позицията на тялото и двигателната активност по време на сън. Сънната апнея е критичен, но често подценяван фактор при оператори в екстремни условия, тъй като води до хронична умора, когнитивни дефицити, забавени реакции и повишен сърдечно-съдов риск. В авиацията нарушенията на съня са пряко свързани с безопасността на полетите, особено при дълги транскеански маршрути и честа смяна на часови зони. В космическите мисии качеството на съня се влияе допълнително от микрогравитацията, изкуственото осветление и повишения психофизиологичен стрес, което прави обективната му оценка чрез холтерни системи особено необходима.

Натрупването на дълговременни холтерни записи не само разширява диагностичните възможности, но и поставя акцент върху анализа на динамичните регулаторни процеси, стоящи в основата на сърдечната дейност. В този контекст вариабилността на сърдечния ритъм се утвърждава като ключов интегративен показател, отразяващ взаимодействието между сърдечно-съдовата система и автономната нервна регулация. Именно поради това в следващия раздел се разглежда физиологичната и информационната същност на вариабилността на сърдечния ритъм (HRV) като основа за интерпретация на дълговременните холтерни записи при оператори, работещи в екстремни условия.

5.4.1. Физиологична и информационна същност на вариабилността на сърдечния ритъм (HRV)

Вариабилността на сърдечния ритъм (Heart Rate Variability – HRV) представлява съвкупност от времевите изменения на интервалите между последователни сърдечни съкращения и се разглежда като един от най-информативните интегрални показатели за функционалното състояние на автономната нервна система и адаптационния потенциал на организма. За разлика от средната сърдечна честота, която отразява общото ниво на сърдечна активност, HRV носи информация за динамиката на регулаторните механизми, които управляват сърдечната функция в условията на променяща се вътрешна и външна среда.

Основата на HRV анализа е редицата от RR интервали, дефинирани като времето между два последователни R-зъбеца на електрокардиограмата. Тази редица не представлява строго периодичен сигнал, а по-скоро реализация на стохастичен, слабо стационарен процес, в който се наслагват влияния от различни регулаторни нива. Всеки RR интервал е резултат от сложното взаимодействие между синусовия възел, автономната нервна система, хуморалните фактори и централните регулаторни структури.

Стохастичният характер на RR интервалите не следва да се интерпретира като „шум“, а като физиологично значима вариабилност, съдържаща информация за адаптивността на сърдечно-съдовата система. Именно тази вариабилност позволява на

организма бързо да се приспособява към физическо натоварване, емоционален стрес, промени в позата, денонощния ритъм и екстремни фактори на средата. Намаляването на стохастичната компонента на RR редицата често е белег за ограничена регулаторна гъвкавост и функционално изчерпване.

5.4.1.1. Адаптация, стрес и декомпенсация

От гледна точка на функционалната диагностика HRV може да се разглежда като количествена мярка за адаптационния резерв на организма. В условия на адекватна адаптация се наблюдава относително висока и структурирана вариабилност, отразяваща ефективна регулация и гъвкав отговор към външни въздействия. При остър или хроничен стрес се активират симпатиковите механизми, което води до редуциране на HRV и доминиране на понискофrequentни или монотонни компоненти на RR редицата.

Продължителното потискане на вариабилността се асоциира с преход от адаптация към функционална декомпенсация, характеризираща се с ограничени регулаторни възможности и повишен риск от ритъмни нарушения, исхемични събития и внезапни функционални сривове. При оператори, работещи в екстремни условия, подобни промени в HRV често предхождат клиничната симптоматика и поради това имат висока прогностична стойност.

В този смисъл HRV не е просто статистическа характеристика на сърдечния ритъм, а информационен прозорец към състоянието на интегративната регулация на организма. Разбирането на нейната физиологична и стохастична природа е необходима предпоставка за адекватен анализ във времевия, честотния и честотно-времевия домейн, които се разглеждат в следващите подраздели.

5.4.2. Анализ на HRV във времевия домейн (Time Domain Analysis)

Анализът на вариабилността на сърдечния ритъм във времевия домейн представлява най-интуитивния и широко използван подход за количествено описание на динамиката на RR интервалите. Той се основава на директна статистическа обработка на времевата редица

от последователни RR интервали и позволява оценка на общото ниво на вариабилност, както и на кратковременните и дълговременните регулаторни влияния. Поради относителната си простота и висока информативност времевите показатели заемат централно място в анализа на дълговременни холтерни записи.

5.4.2.1. Статистически показатели

Ако редицата от нормални RR интервали се представи във вида:

$$RR_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.1)$$

а) *Средна стойност на RR интервалите* се определя от израза:

$$\bar{RR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RR_i \quad (5.2)$$

Този параметър е пряко свързан със средната сърдечна честота, но сам по себе си не носи информация за регулаторната гъвкавост.

б) *SDNN (Standard Deviation of NN intervals)*

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \bar{RR})^2} \quad (5.3)$$

SDNN отразява общата вариабилност на сърдечния ритъм и включва влиянието както на бързите, така и на бавните регулаторни механизми. При 24-часови записи SDNN се счита за интегрален показател за адаптационния резерв на организма.

в) *RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)*

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2} \quad (5.4)$$

RMSSD е чувствителен към бързите изменения между съседни RR интервали и се приема като индиректен маркер за парасимпатиковата (вагусова) активност:

$$pNN50 = \frac{\text{брой на } |RR_{i+1} - RR_i| > 50 \text{ ms}}{N-1} \times 100\% \quad (5.5)$$

Този показател също отразява кратковременните вариации и има сходна физиологична интерпретация с RMSSD.

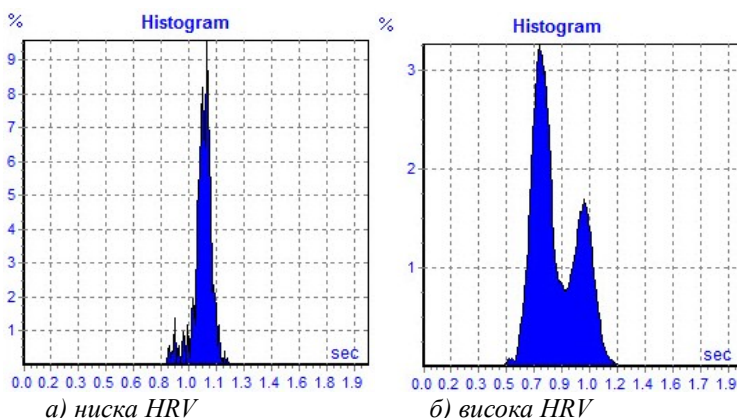
5.4.2.2. Геометрични методи

Геометричните методи представят RR интервалите под формата на разпределения или фазови изображения и позволяват визуална и количествена оценка на структурата на вариабилността.

а) Хистограмен анализ

RR интервалите се групират в класове, като се анализира формата на разпределението. Широка и симетрична хистограма е характерна за висока вариабилност и добра адаптация, докато тясно и заострено разпределение свидетелства за доминиращ регулаторен механизъм и редуцирана гъвкавост. HRV триъгълен индекс:

$$HRV_{triangular} = \frac{\text{общ брой RR интервали}}{\text{максимална височина на хистограмата}} \quad (5.6)$$



Фиг. 29. Хистограми на сърдечния ритъм, генерирани от холтер за 24-часов непрекъснат запис ER02

Индексът $HRV_{triangular}$ е устойчив спрямо артефакти и е особено подходящ за дълговременни холтерни записи.

б) Диаграма на последователните RR интервали

В този метод всеки RR интервал се нанася като функция на предходния:

$$RR_{i+1} = f(RR_i) \quad (5.7)$$

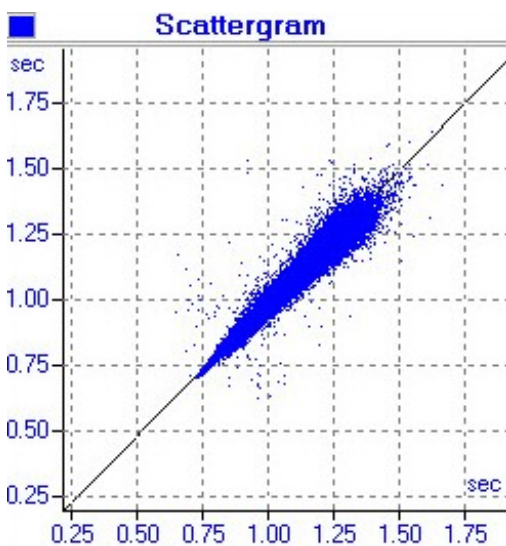
Полученото разсейване на точките се описва чрез две основни оси:

- SD1 – кратковременна вариабилност (парасимпатиково влияние);

$$SD1 = \frac{RMSSD}{\sqrt{2}} \quad (5.8)$$

- SD2 – дълговременна вариабилност (общ регулаторен тонус).

$$SD2 = \sqrt{2SDNN^2 - SD1^2} \quad (5.9)$$



Фиг. 30. Диаграма на последователните RR интервали, генерирана от холтер за 24-часов запис ER02

Съотношението SD1/SD2 дава информация за баланса между бързите и бавните регулаторни процеси.

При оператори, работещи в екстремни условия, времевите показатели на HRV имат не само диагностична, но и прогностична стойност. При пилоти, изпълняващи дълги или нощни полети, често се наблюдава намаляване на RMSSD и pNN50, което отразява потискане на парасимпатиковата активност вследствие на психоемоционален стрес и нарушения на циркадния ритъм. Продължително понижени стойности на SDNN могат да бъдат интерпретирани като сигнал за хронично функционално претоварване и ограничен адаптационен резерв.

В условията на космически полет времевият анализ на HRV позволява да се проследят етапите на адаптация към микрогравитация. В началните фази често се регистрира редуцирана вариабилност, свързана с остър стрес и преразпределение на телесните течности, докато при успешна адаптация се наблюдава частично възстановяване на SDNN и геометричните показатели. Обратно, персистиращо ниски стойности могат да бъдат маркер за преход към функционална декомпенсация.

В заключение, анализът на HRV във времевия домейн предоставя количествена основа за оценка на автономната регулация и адаптационния потенциал, особено ценна при дълговременни холтерни записи. Той служи като първо ниво на интерпретация, което подготвя основата за по-задълбочен анализ в честотния и честотно-времевия домейн, разгледани в следващите подраздели.

5.4.3. Анализ на HRV във честотния домейн (Frequency Domain Analysis)

При оператори, работещи в екстремни условия (пилоти, космонавти, водолази), сигналите на вариабилността на сърдечната честота са изразено нестационарни, поради бързи промени в натоварването, автономната регулация и външните фактори. Поради това честотният анализ е информативен само в строго контролирани времеви интервали и трябва да се комбинира с допълващи методи.

Честотният анализ на ритмограмата разширява значително информативността на дълговременните записи на сърдечния ритъм, тъй като позволява разлагане на вариабилността на RR интервалите

на отделни честотни компоненти, свързани с конкретни физиологични регулаторни механизми. За разлика от времевия анализ, който дава интегрална оценка на вариабилността, честотният подход предоставя спектрална интерпретация на автономната регулация, разкривайки относителния принос на симпатиковите и парасимпатиковите влияния върху сърдечния ритъм.

Чрез изчисляване на спектралната плътност на мощността на ритмограмата става възможно разграничаването на стандартни честотни диапазони, в които се концентрират различни регулаторни процеси. Високочестотният диапазон (HF) се асоциира предимно с дихателно-медираната парасимпатикова активност, докато нискочестотният диапазон (LF) отразява комбинирано симпатиково и парасимпатиково влияние, включително барорефлексната регулация. Многонискочестотните компоненти (VLF) носят информация за по-бавни хуморални и терморегулаторни процеси, които са практически недостъпни за анализ чрез краткотрайни записи.

Особена полза честотният анализ има при изследване на динамични и нестационарни състояния, характерни за оператори в екстремни условия. При пилоти честотният анализ на ритмограмата позволява да се проследи преходът от парасимпатиково доминирана регулация в покой към симпатикова активация по време на натоварване или психоемоционален стрес, както и да се оцени степента и скоростта на възстановяване след полет. При космонавти спектралният анализ предоставя ценна информация за измененията в автономния баланс, свързани с адаптацията към микрогравитация и нарушените циркадни ритми по време на мисии на борда на Международната космическа станция.

В допълнение, честотният анализ на ритмограмата има важно прогностично значение. Продължителното доминиране на нискочестотни компоненти и редукцията на високочестотната мощност често се асоциират с хроничен стрес, изчерпване на адаптационния резерв и повишен риск от сърдечно-съдови усложнения. В този смисъл спектралният анализ не само допълва времевия подход, но и предоставя функционален „отпечатък“ на автономната регулация, който е особено ценен при интерпретация на дълговременни холтерни записи в авиацията и космонавтиката.

Честотен анализ на ритмограмата представлява анализ на RR-интервалната редица $x(t)$, която се разглежда като реализация на стохастичен процес. Непрекъснатото преобразование на Фурие е дефинирано като:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.10)$$

Спектралната плътност на мощността (PSD) се определя чрез:

$$S(f) = |X(f)|^2 \quad (5.11)$$

При дискретни RR-интервали на практика се използва FFT, като мощността в дадена честотна лента се изчислява чрез интегриране:

$$P_{band} = \int_{f_1}^{f_2} S(f) df \quad (5.12)$$

VLF, LF и HF компоненти

$$P_{VLF} = \int_0^{0.04} S(f) df \quad (5.13)$$

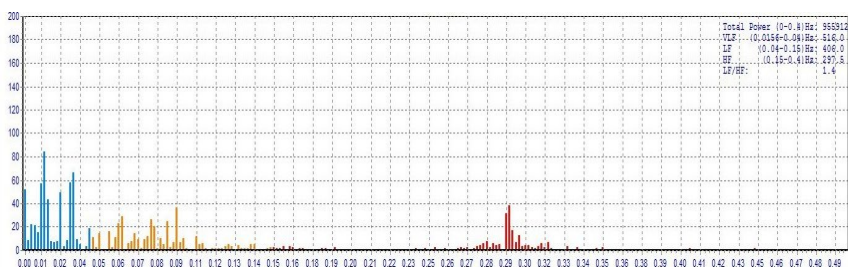
$$P_{LF} = \int_{0.04}^{0.15} S(f) df \quad (5.14)$$

$$P_{HF} = \int_{0.15}^{0.40} S(f) df \quad (5.15)$$

Съотношението

$$\frac{LF}{HF} = \frac{P_{LF}}{P_{HF}} \quad (5.16)$$

се използва като индикатор за автономна регулация, но при екстремни условия трябва да се интерпретира с повишено внимание.



Фиг. 31. Спектър на ритмограмата за 5-минутен ЕКГ запис, генериран от холтера ER02 (VLF син цвят, LF жълт цвят, HF червен цвят)

5.4.3. Анализ на HRV във честотно-времеви domeйн (Time-Frequency Domain Analysis)

За преодоляване на нестационарността се използва непрекъснатото вълново преобразуване (CWT):

Предимства на wavelet трансформацията за преодоляване на нестационарността произтичат от нейната способност да анализира сигнали едновременно във времето и честотата с променлива разделителна способност.

Основните предимства са:

а) Адаптивна времево-честотна резолюция

Wavelet трансформацията използва тесни прозорци при високи честоти и широки прозорци при ниски честоти. Това позволява прецизно регистриране на бързи преходни процеси и едновременно с това добра честотна разделителна способност за бавно изменящи се компоненти.

б) Ефективен анализ на силно нестационарни сигнали

За разлика от FFT и STFT, wavelet методите не изискват сигналът да бъде стационарен дори локално за фиксирана дължина на прозореца. Това ги прави особено подходящи за биомедицински сигнали (ЕКГ, ЕМГ, ЕЕГ), вибрации и импулсни процеси.

в) Добра локализация на преходни събития

Wavelet трансформацията позволява точно определяне на момента на поява на краткотрайни събития, пикове, артефакти и резки промени в сигнала, което е затруднено при класическата FFT.

г) Анализ с променлива разделителна способност

Сигналът се разглежда в различни мащаби, което позволява отделяне на глобални тенденции и локални детайли в единна математическа рамка.

д) Повишена устойчивост към шум

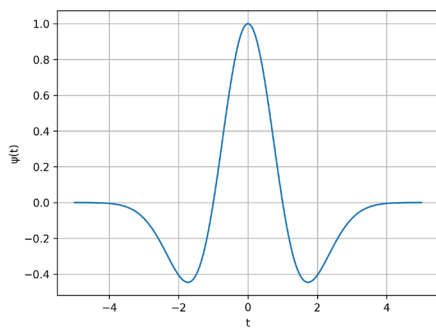
Чрез подходящ избор на wavelet функция и мащабите на анализ може ефективно да се потиска шум и да се извършва денойзинг, без значителна загуба на полезна информация.

В обобщение, wavelet трансформацията превъзхожда FFT при анализ на нестационарни сигнали, тъй като осигурява гъвкава, локализирана и физически по-интерпретируема времево-честотна характеристика на сигнала.

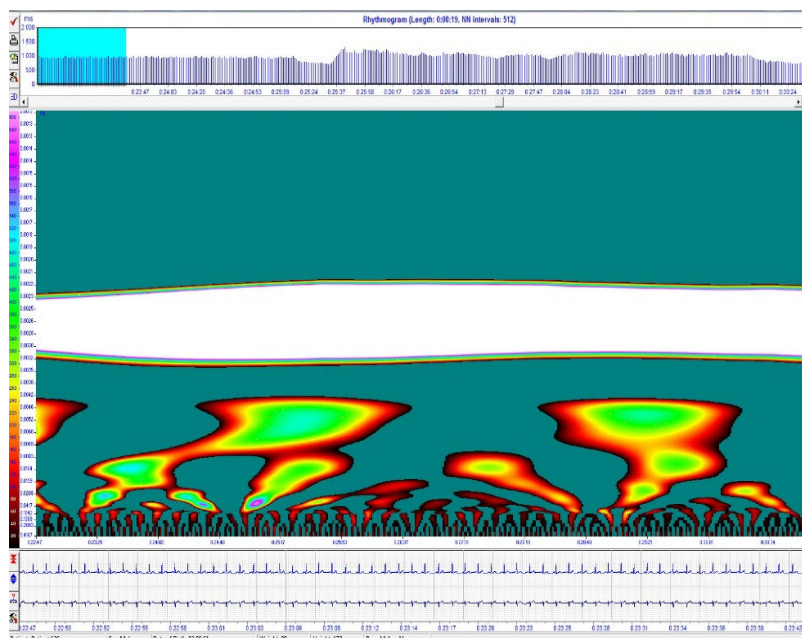
$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5.17)$$

Където $\psi(t)$ е базовата функция (mother wavelet). (фиг.32)

$$\psi(t) = (1 - t^2)e^{-t^2/2} \quad (5.18)$$



Фиг. 32. Графичен вид на wavelet функцията Мексиканска шапка



Фиг. 33. 2-D wavelet анализ с прилагане на функция Мексиканска шапка, генериран от програмата за анализ на холтера ER-02

Тази wavelet функция:

- има отлична локализация;
- чувствителна е към резки промени;
- особено подходяща за детекция на патологични събития и преходни автономни реакции.

За коректна интерпретация на HRV при екстремни условия е задължително интегриране с:

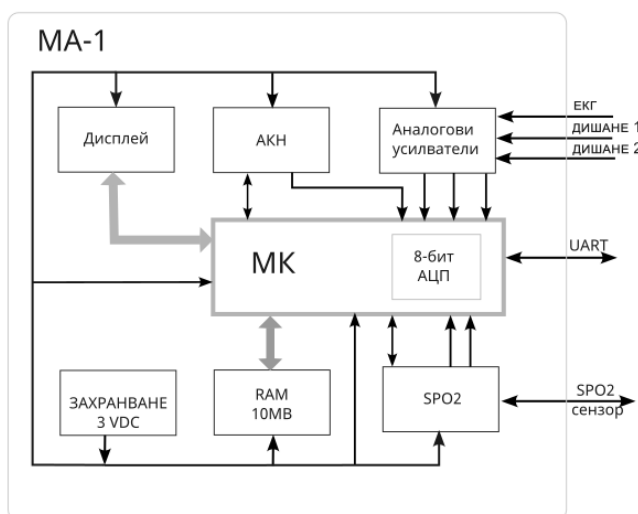
- дихателна честота и дълбочина
- механично натоварване (G-сили, налягане)
- кислородна сатурация
- температура на тялото
- когнитивно и психоемоционално натоварване.

В заключение може да се каже, че при пилоти, космонавти и водолази нито един HRV метод самостоятелно не е достатъчен. Най-надежден подход е:

$$HRV_{\text{оценка}} = FFT + SD1/SD2 + \text{вр. показатели} + \text{контекст} \quad (5.19).$$

Този мултипараметричен анализ позволява адекватна оценка на автономната регулация при силно динамични и нестационарни условия.

Изследването на вариабилността на сърдечната честота (HRV) чрез ЕКГ холтер ER02 предоставя ценна информация за автономната регулация на сърдечно-съдовата система и нейния отговор на физиологични и патологични стимули. Анализът на HRV е утвърден метод за оценка на баланса между симпатиковата и парасимпатиковата нервна система и се използва широко при изследвания, свързани със стрес, кардиоваскуларен риск и функционалното състояние на организма.



Фиг. 34. Блокова схема на холтер за сънна апнея MA-1

Въпреки това автономната дисфункция рядко се проявява изолирано и често е тясно свързана с нарушения на дишането по време на сън. В този контекст сънната апнея представлява съществен клиничен и физиологичен фактор, който оказва директно влияние върху сърдечния ритъм, кислородната сатурация и вегетативния контрол. Повтарящите се апнеични и хипопнеични епизоди водят до характерни промени в HRV параметрите, които не могат да бъдат напълно интерпретирани без едновременно отчитане на дихателните събития.

Поради тази причина изследователският фокус логично се разширява от класическия HRV анализ с ЕКГ холтер ER02 към комплексна оценка на сънната апнея, реализирана чрез мултипараметричния холтер MA-1. Последният позволява синхронно регистриране и анализ на кардиореспираторни сигнали, създавайки предпоставки за по-задълбочена интерпретация на взаимодействието между сърдечната автономна регулация и дихателните нарушения по време на сън.

Този интегративен подход осигурява методологична приемственост между HRV анализа и диагностиката на сънна апнея,

като същевременно повишава диагностичната стойност и клиничната приложимост на получените резултати. Блоквата диаграма на холтера МА1 е показана на (фиг. 34).

Разработената система МА-1 представлява малка, преносима, мултипараметрична измервателна апаратура, предназначена за дългосрочен мониторинг на кардиореспираторни физиологични параметри при изследване на сънни нарушения. Основното ѝ предимство е съчетаването на минимален хардуерен обем с функционална гъвкавост, позволяваща използването ѝ както като специализиран холтер за анализ на сънна апнея, така и като еднопараметричен диагностичен инструмент.

Блоквата схема на МА-1 (фиг. 34) е изградена около централен микроконтролер (МК) , който осъществява управлението на измервателните канали, цифровата обработка на сигналите, визуализацията на данните и комуникацията с външни устройства. Системата е захранвана с две АА NiMh батерии със стабилизирани 3.3 V DC източник, което позволява продължителна автономна работа и я прави подходяща за нощни полисомнографски изследвания в домашни условия.

Към микроконтролера са свързани периферни блокове за аналогова обработка, аналогово-цифрово преобразуване, памет, дисплей и сензорни модули, които формират цялостната измервателна платформа.

Системата МА-1 е проектирана да регистрира едновременно следните физиологични параметри:

- *Един канал електрокардиограма (ЕКГ)*

ЕКГ сигналът се подава към аналогов усилвател, където се осъществява предварително усилване и филтрация с цел потискане на шумове и артефакти. Полученият сигнал се дигитализира чрез 8-битов АЦП и се използва както за анализ на сърдечния ритъм, така и за изчисляване на производни показатели, включително HR и HRV параметри.

- *Артериално кръвно налягане (BP)*

Измерването на артериалното налягане се осъществява чрез външен модул, управляван от микроконтролера, като данните се интегрират в общия анализ на кардиоваскуларното състояние на изследваното лице.

- *Насищане на кръвта с кислород (SpO_2)*

SpO_2 модулът е директно свързан към микроконтролера и предоставя информация за кислородната сатурация, която е ключов показател при диагностика на сънна апнея. Десатурационните епизоди са пряко свързани с апнеичните и хипопнеичните събития и допълват кардиореспираторния анализ.

- *Два канала, анализиращи дишането*

Системата разполага с два независими канала за регистриране на:

- а) Наличие на дишателни движения в гръдния кош
- б) Наличие на въздушен поток в трахеята.

Тази двуканална конфигурация е от съществено значение за диференциалната диагностика на различните типове апнея.

Диагностиката на сънна апнея се свежда до:

Едновременното регистриране на ЕКГ, SpO_2 и двата дишателни канала позволява на МА-1 да идентифицира и класифицира основните типове дишателни нарушения по време на сън:

- Централна апнея – характеризира се с липса на дишателни движения и липса на въздушен поток;
- Обструктивна апнея – при наличие на дишателни усилия в гръдния кош, но отсъствие на въздушен поток;
- Смесена апнея – комбинираща характеристики на централна и обструктивна апнея;
- Хипопнея – частично намаляване на дишателния поток, съпроводено с десатурация и промени в сърдечната честота.

Тази функционалност превръща МА-1 в компактна алтернатива на класическите полисомнографски системи за скрининг и дългосрочен мониторинг (фиг. 35).



Фиг. 35. Диагностика на сънна апнея с холтер MA-1

Системата разполага с RAM памет (10 MB) за временно съхранение на измерените данни, което позволява непрекъснат запис по време на целия период на изследване. Екранният модул осигурява визуализация на текущите измервания, системното състояние и навигация в конфигуриращото меню.

Комуникацията с външни устройства се осъществява чрез UART интерфейс със скорост на обмен на данните 115200 kBit/s, което улеснява трансфера на данни за последващ анализ и архивиране.

Конфигурируемост и мултифункционалност

Съществено предимство на MA-1 е възможността чрез конфигуриращ екран и меню системата лесно да бъде адаптирана към различни диагностични задачи. Без хардуерни промени апаратурата може да функционира като:

- Едноканален ЕКГ холтер
- Холтер за артериално кръвно налягане
- SpO₂ холтер.

Тази гъвкавост позволява използването на МА-1 както в клинична практика, така и в научноизследователски приложения, без необходимост от допълнителна апаратура.

Външният вид на холтера МА-1 е показан на фиг.36:



Фиг. 36. Пълна конфигурация на холтер за сънна апнея МА-1

В обобщение, холтер системата за сънна апнея МА-1 демонстрира оптимален баланс между компактност, функционалност и конфигурируемост. Комбинирането на кардиологични, респираторни и оксиметрични измервания в едно малко, преносимо устройство създава предпоставки за ефективна диагностика на сънна апнея и за разширяване на приложението на системата към други холтерни изследвания.

Проследеното в настоящия раздел развитие на системите за психо-физиологичен мониторинг очертава последователна и логически непрекъсната научна линия, в която технологичните решения са пряко подчинени на еволюцията на методологичните

представи за човека като активен и адаптиращ се елемент в сложни операторски системи. От ранните интегрирани апаратурни комплекси до съвременните мултимодални платформи, акцентът постепенно се измества от надеждната регистрация на отделни физиологични параметри към комплексен анализ на поведението, автономната регулация и адаптационните механизми в условия на екстремно натоварване.

Ранните системи, представени от ССОД „Зора“, поставят основите на интегрирания подход, като доказват възможността за дългосрочна, устойчива и синхронна регистрация на психо-физиологични показатели в реална космическа среда. Тяхното значение надхвърля чисто инженерния успех, тъй като за първи път осигуряват експериментална база за обективно изследване на адаптацията и операторската надеждност при продължителен престой в микрогравитация. В същото време именно този опит ясно разкрива необходимостта от разширяване на изследователския фокус към когнитивните и централните регулаторни процеси.

Тази необходимост намира своята реализация в интегрираните експериментални платформи от типа Невролаб-Б, при които измерването, управлението на въздействията и анализът на операторската дейност са обединени в единна архитектура. Невролаб-Б утвърждава принципа на синхронното изследване на поведение, когнитивни процеси и автономни физиологични реакции, като същевременно въвежда методично значими решения за минимизиране на интерфейсно индуцираните артефакти и повишаване на екологичната валидност на експериментите. По този начин системата маркира прехода от регистратор на реакции към инструмент за анализ на психо-физиологичната организация на операторската дейност.

Следващият етап от еволюцията, реализиран в BeON-1, представлява качествен концептуален скок – от апаратура към система. Тук психо-физиологичният мониторинг се интегрира в активно управлявана експериментална среда, в която стресът не е външно наложен фактор, а структурен елемент на задачата. Комбинирането на постурално, моторно и когнитивно натоварване при условия на информационно пренасящане позволява да се изследват не само реакциите на оператора, но и неговите индивидуални стратегии за справяне, устойчивостта на

функционалните механизми и динамиката на адаптацията във времето. В този смисъл ВеON-1 надхвърля традиционните експериментални парадигми и въвежда системен подход към анализа на човека в екстремна среда.

Допълването на експерименталните платформи с дълговременен автономен мониторинг чрез холтерни системи и анализ на вариабилността на сърдечния ритъм разширява времевия хоризонт на изследванията и осигурява достъп до бавните, кумулативни и контекстно зависими процеси на автономна регулация. Холтерните записи и HRV анализът позволяват да се проследят циркадни ритми, хроничен стрес и адаптационен резерв в реални условия на живот и професионална дейност, като по този начин допълват лабораторните и експериментални изследвания с информация, недостъпна за краткотрайни тестове.

5.5. Физиологичен мониторинг в хипербарни условия чрез DBML

Работата в хипербарни условия е свързана със значителни физиологични натоварвания и повишен риск от остри и отложени нарушения на жизнените функции. Промените в околното налягане и газовия състав на вдишваната среда оказват съществено влияние върху сърдечно-съдовата, дихателната и терморегулаторната система на човешкия организъм. В тези условия ранното откриване на неблагоприятни физиологични реакции е от критично значение за предотвратяване на декомпресионни инциденти и други животозастрашаващи състояния.

Непрекъснати физиологичен мониторинг в хипербарна среда позволява обективна оценка на адаптационните механизми на организма, както и своевременна медицинска интервенция при отклонения от нормалните показатели. Съчетаването на физиологични данни с параметрите на хипербарната експозиция създава предпоставки за оптимизиране на протоколите на компресия и декомпресия и за повишаване на безопасността на операторите.



Фиг. 37. Регистриране на физиологични параметри в хипербарни условия

В този контекст използването на носими мониторингови системи, способни да работят надеждно при високо налягане и да предават данни в реално време, представлява ключов елемент от съвременния медицински контрол в хипербарната медицина.

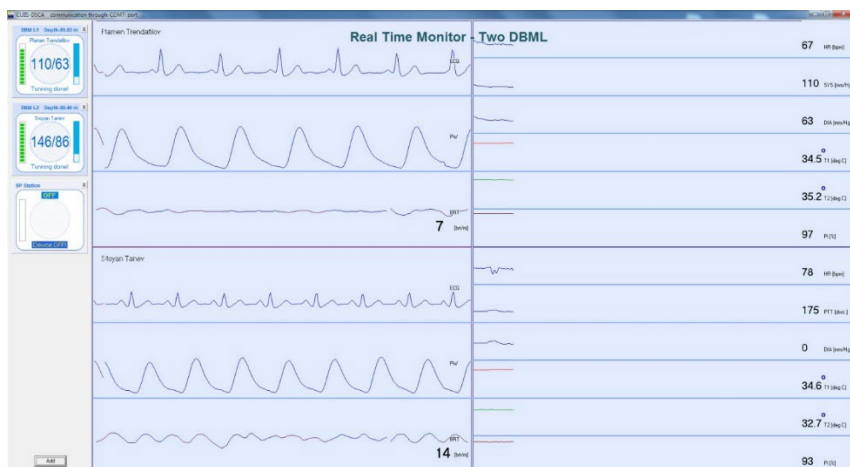
DBML (Diver Body Monitor Lab) представлява носимо устройство за комплексен физиологичен мониторинг на оператори, работещи в хипербарни условия. Системата осигурява непрекъснато измерване и регистриране на следните физиологични параметри:

- артериално кръвно налягане (АКН);
- електрокардиограма (ЕКГ);
- честота на дишане;
- пулсова вълна;
- температура на торса, приемана като индикатор за централна телесна температура;
- температура на ръката, използвана като показател за периферна температура;
- степен на оросяване на крайниците (периферна перфузия).

Освен физиологичните показатели, DBML измерва и налягането в хипербарната камера, както и температурата на околната среда,

като ги съпоставя с всички регистрирани физиологични параметри. Това позволява проследяване на реакциите на организма при различни режими на компресия и декомпресия, както и запис и анализ на различни декомпресионни протоколи. Блоквата схема на прибора е показана на фиг. 36.

Събраните данни се предават в реално време по безжична радио линия на честота 2.4 GHz. Чрез трансиверен модул информацията постъпва в стандартен компютър, разположен на работното място на наблюдаващия лекар, извън камерата, където данните се визуализират онлайн и могат да бъдат анализирани в хода на експозицията (фиг. 37).



Фиг. 38. Монитор за наблюдение в реално време на физиологичните параметри на двама водолази, едновременно регистрирани с DBML

Особено важно предимство на системата DBML е възможността тя да бъде използвана в хипербарни камери, които не разполагат с вградено медицинско оборудване, без да се налагат каквито и да било конструктивни промени или технически доработки на камерата. Това значително разширява приложното ѝ поле, включително в мобилни, полеви и учебно-тренировъчни хипербарни комплекси, където стандартно липсват специализирани системи за физиологичен контрол.



Фиг. 39. Външен вид на прибора DBML

Системата позволява пълноценен дистанционен медицински мониторинг, при който не е необходимо присъствието на лекар вътре в хипербарната камера. Наблюдаващият медицински специалист се намира извън камерата и разполага с непрекъсната, синхронизирана и визуализирана в реално време информация за физиологичното състояние на операторите. Това повишава както безопасността, така и оперативната ефективност на хипербарните процедури, особено при продължителни експозиции или при работа с повече от един оператор едновременно.

Липсата на необходимост от модификации по конструкцията на камерата е съществено предимство и от гледна точка на сертификацията и експлоатационната надеждност, тъй като не се нарушава херметичността, механичната здравина или системите за поддържане на налягането. DBML функционира като автономна,

външно независима мониторингова система, което улеснява внедряването ѝ в съществуващи хипербарни съоръжения.

По този начин DBML допринася за демократизиране на медицинския контрол в хипербарната медицина, като осигурява високо ниво на физиологичен мониторинг дори в условия, където традиционно такъв не е наличен. Това създава предпоставки за повишаване на безопасността на операторите, оптимизиране на режимите на компресия и декомпресия и намаляване на риска от остри и отложени хипербарни инциденти.

В обобщение, представената еволюция на различни прибори демонстрира преход от фрагментирано измерване към системен, мултимодален и контекстно ориентиран психо-физиологичен мониторинг. В рамките на тази научна линия човекът оператор се разглежда не като пасивен носител на физиологични сигнали, а като динамична, адаптираща се система, чиято надеждност и ефективност се определят от сложното взаимодействие между поведение, когнициия и автономна регулация. Този подход формира стабилна методологична основа за съвременни и бъдещи изследвания в авиационната, космическата и екстремната медицина и подчертава значението на интегрираните системи като ключов инструмент за оценка на човешката дейност в условия на повишен риск и отговорност.

ГЛАВА 6

ИНТЕГРИРАНИ ПРИЛОЖЕНИЯ, МЕТОДИЧНИ ПОДХОДИ И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ НА СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР В ЕКСТРЕМНИ СРЕДИ

Разгледаните в предходните глави сензорни технологии, апаратурни архитектури и принципи на биомедицинско измерване формират теоретичната и инженерната основа за изграждане на системи за мониторинг на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор. Настоящата глава разширява този анализ, като поставя разработените решения в контекста на тяхното реално приложение в различни екстремни среди и разглежда методичните и технологичните предпоставки за тяхното бъдещо развитие.

Екстремните условия – космически, авиационни, подводни и свързани с управление на сложни технически системи – се характеризират с повишен риск, ограничени ресурси и високи изисквания към надеждността на човешката дейност.

В тези среди човекът оператор се превръща в критичен елемент на системата „човек–машина–среда“, чиято функционална устойчивост определя безопасността и ефективността на цялостната мисия или технологичен процес. Това налага интегриран подход, при който физиологичният мониторинг, интелигентната обработка на данни и адаптивната автоматизация действат синергично.

Настоящата глава има три основни цели. Първо, да анализира специфичните физиологични и психо-физиологични рискове в различни екстремни среди и да очертае изискванията към системите за мониторинг и защита. Второ, да представи методичните принципи и експериментални протоколи, осигуряващи научна валидност и практическа приложимост на разработените технологии. Трето, да разгледа водещите тенденции в развитието на интелигентни, миниатюризирани и персонализирани системи, включително ролята на изкуствения интелект като активен компонент в управлението на риска и поддържането на работоспособността.

По този начин се очертава концептуалната рамка за следващото поколение системи за мониторинг на човека оператор в условия, при които границите на физиологичната и когнитивната адаптация са подложени на системно изпитание.

6.1. Космическа медицина и дългосрочни мисии

6.1.1. Физиологични и психо-физиологични ефекти на космическата среда

Продължителното пребиваване на човека в условия на микрогравитация индуцира комплексни структурни и функционални промени в основни физиологични системи, като костно-мускулната, сърдечно-съдовата и невро-вегетативната регулация. Липсата на механично натоварване води до дисбаланс между остеобластната и остеокластната активност, което се проявява като ускорена костна резорбция и редукция на костната минерална плътност, особено в носещите части на скелета. Паралелно с това се наблюдава изразена атрофия на скелетната мускулатура, съпроводена от промени в мускулните влакна и нарушена невромускулна активация, което компрометира функционалната издръжливост и силовия капацитет на организма (LeBlanc et al., 2000; Nicogossian et al., 2016).

Кардиоваскуларната система също претърпява значителна адаптация, обусловена от преразпределението на телесните течности и намаленото хидростатично натоварване. Документирани са промени в обема и геометрията на сърдечния мускул, редукция на плазмения обем и нарушена автономна регулация на съдовия тонус, което води до понижена ортостатична толерантност след завръщане в условията на земна гравитация. Тези изменения повишават риска от синкопални епизоди и ограничават оперативната готовност на астронавтите в критични фази на мисията (Nicogossian et al., 2016).

Наред с механичните и хемодинамични фактори, значима роля играе и хроничната експозиция на йонизираща радиация. Галактичните космически лъчи и слънчевите протонни събития създават кумулативен радиационен товар, който надхвърля типичните земни нива и представлява сериозен биологичен риск.

Съвременните изследвания свързват този тип експозиция не само с повишена канцерогенна опасност, но и с потенциални дългосрочни неврокогнитивни нарушения, включително увреждане на хипокампаалните структури, промени в невровъзпалителните процеси и ускорено развитие на дегенеративни неврологични състояния (Cucinotta & Durante, 2006; Chancellor et al., 2014).

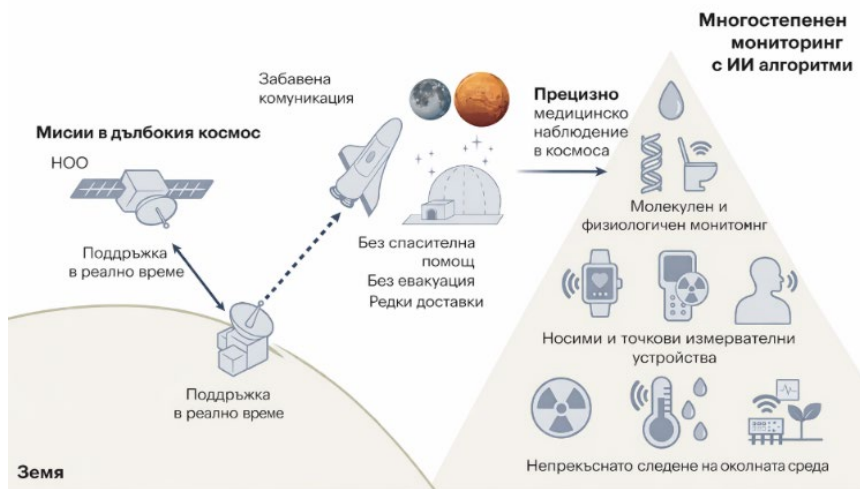
Психологическите и психосоциалните фактори допълнително усложняват адаптационния профил на организма в условията на дългосрочни космически мисии. Изоляцията, конфинементът, ограниčenата сензорна стимулация и редуцираните социални взаимодействия създават хроничен стресов фон, който оказва влияние върху когнитивната ефективност, емоционалната стабилност и междуличностната динамика в екипажа. Натрупването на психоемоционално напрежение може да доведе до нарушения в изпълнителните функции, понижаване на вниманието и компрометиране на вземането на решения, което има пряко значение за безопасността и успеха на мисията (Kanas & Manzey, 2008).

В този контекст става ясно, че физиологичните, радиационните и психологическите фактори в космическата среда действат синергично, формирайки многокомпонентен рисков профил. Това налага прилагането на интегриран, системен подход към медицинския мониторинг и адаптационните стратегии, основан на непрекъснато наблюдение, персонализирана превенция и ранна диагностика на неблагоприятните изменения.

6.1.2. Системи за физиологичен мониторинг и адаптация

Съвременните космически медицински системи са ориентирани към непрекъснат, неинвазивен и автономен мониторинг, комбиниращ кардиореспираторни, неврофизиологични и мускулни параметри. Изискванията включват радиационна устойчивост, ниска консумация на енергия, локална обработка на данни и устойчивост на температурни цикли (Durante & Cucinotta, 2008). Особено значение имат адаптивните алгоритми, които корелират физиологичните показатели с натоварването и автоматично коригират тренировъчните режими и профилактичните интервенции (Clément & Bukley, 2019).

В условията на дългосрочни космически мисии, характеризиращи се със забавена комуникация със Земята, липса на възможност за евакуация и ограничени логистични ресурси системите за медицинско осигуряване следва да бъдат проектирани като автономни, многослойни и интелигентни платформи за мониторинг и вземане на решения. Концептуалната архитектура на подобна интегрирана система е представена на фиг. 40.



Фиг. 40. Концептуална архитектура на многослойна платформа за медицински изследвания

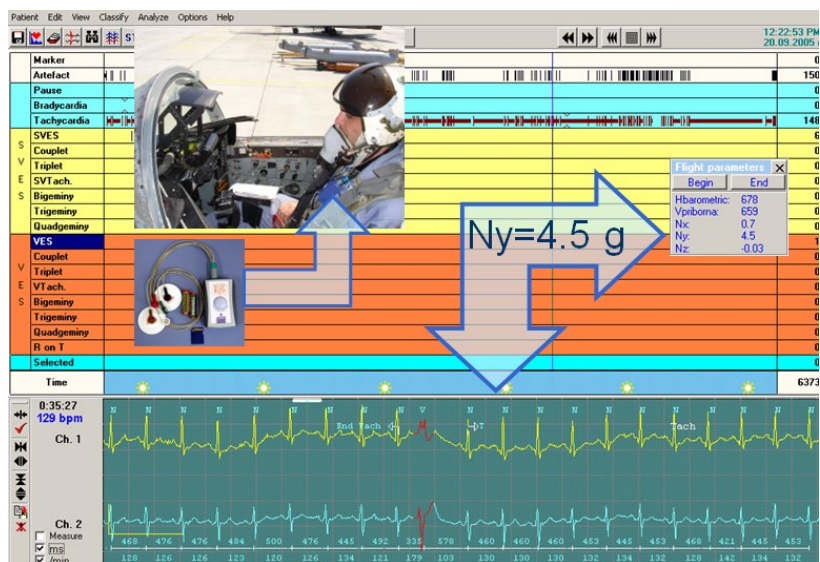
6.1.3. Авиационна медицина.

Физиологични рискове при авиационна експлоатация

Авиационната експлоатационна среда се характеризира с комплексно взаимодействие между физични, физиологични и когнитивни фактори, които оказват съществено влияние върху функционалното състояние и оперативната надеждност на летателния персонал. Сред основните стресори се открояват бързите и често циклични промени в барометричното налягане, вариациите в парциалното налягане на кислорода, експозицията на значителни

G-натоварвания, както и необходимостта от поддържане на продължително внимание и вземане на решения в условия на времеви дефицит.

Хипоксията представлява един от най-критичните физиологични рискове в авиацията, особено при височинни полети и при аварийни ситуации, свързани с разхерметизация на кабината. Дори при умерено понижаване на кислородното насищане могат да се наблюдават субклинични нарушения на когнитивните функции, включително забавяне на реакционното време, нарушена работна памет и понижена точност при изпълнение на сложни задачи. Тези изменения често остават незабелязани от самия оператор, което увеличава риска от неадекватни решения и човешка грешка (Wickens et al., 2015).



Фиг. 41. ЕКГ запис с холтер ER02 по време на боен полет с изстребител – претоварване 4.5G

Експозицията на надлъжни и напречни G-натоварвания, характерна за военната и високоманеврената авиация, води до значително преразпределение на кръвния обем и компрометиране на

церебралната перфузия. Това може да предизвика явления като G-индуцирана загуба на съзнание (G-LOC), тунелно зрение и временна дезориентация, които имат директни последици за безопасността на полета. Дори при използване на противопретоуарващи костюми и специализирани дихателни техники, остатъчният риск остава значим и изисква непрекъснат физиологичен мониторинг (фиг. 41).

Натрупаната умора и хроничното нарушаване на циркадните ритми при дълги полети, нощни операции и междуконтинентални маршрути представляват допълнителен ключов фактор за деградация на изпълнението. Физиологичната умора се проявява не само чрез субективно усещане за изтощение, но и чрез измерими промени в автономната регулация, вниманието и скоростта на обработка на информация. Многобройни изследвания показват, че умората е сред водещите детерминанти на човешка грешка в авиацията и често действа в синергия с други рискови фактори като хипоксия и висок когнитивен товар (Caldwell et al., 2009).

В този контекст авиационната медицина разглежда физиологичните рискове не като изолирани явления, а като динамична система от взаимносвързани процеси, които изискват комплексен и превантивен подход, основан на непрекъснато наблюдение и ранна интервенция.

6.1.4. Интерфейси и системи за ранно предупреждение

Ефективното управление на физиологичните рискове в авиацията изисква внедряването на интегрирани системи за ранно предупреждение, които съчетават физиологичен мониторинг, интелигентна обработка на данни и оптимизиран човеко-машинен интерфейс. Основна цел на тези системи е минимизирането на внимателния товар върху пилота, като същевременно се осигурява своевременно и недвусмислено сигнализиране при настъпване на критични състояния.

Човеко-машинният интерфейс в авиационната среда трябва да бъде проектиран в съответствие с принципите на ергономията и инженерната психология, като отчита ограничените когнитивни ресурси на оператора в критични фази на полета. Представянето на физиологичната информация следва да бъде приоритетно, контекстно зависимо и адаптивно, като алармените сигнали за

състояния с висок риск (напр. хипоксия, прекомерна умора или физиологична декомпенсация) имат по-висок приоритет от второстепенните информационни съобщения (Reason, 1990; Wickens et al., 2015).

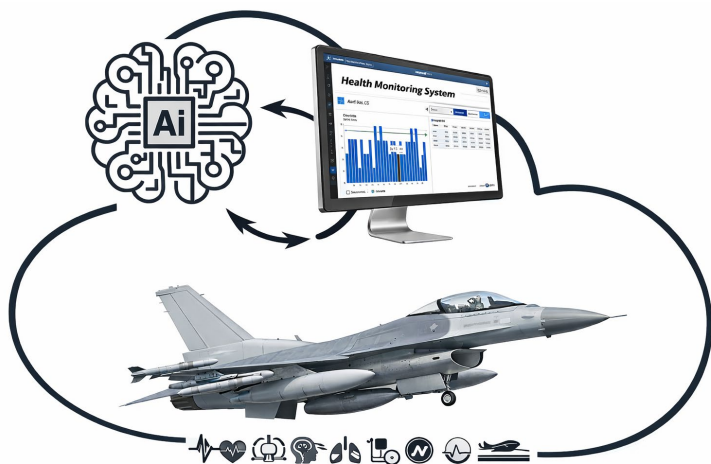
Съвременните авиационни системи за медицински мониторинг все по-често използват адаптивни алгоритми, които анализират тенденциите във физиологичните параметри, вместо да разчитат единствено на фиксирани прагови стойности. Този подход позволява ранно откриване на латентни изменения и прогнозиране на потенциална деградация на изпълнението, още преди настъпването на клинично изразени симптоми. Например комбинираният анализ на вариабилността на сърдечната честота, дихателните параметри и поведението на оператора може да служи като индикатор за нарастваща умора или стрес.

Особено значение има интеграцията на физиологичните системи за предупреждение с авиониката и автоматизираните помощни функции на летателния апарат. В критични ситуации това позволява временно прехвърляне на част от задачите към автоматиката или модифициране на информационния поток към пилота с цел поддържане на ситуационната осведоменост и предотвратяване на когнитивно претоварване. Концепцията за адаптивна автоматизация се разглежда като ключов елемент в съвременния авиационен дизайн и има потенциал значително да намали вероятността от човешка грешка (Reason, 1990).

В заключение, интерфейсите и системите за ранно предупреждение в авиационната медицина представляват критична връзка между физиологичното състояние на оператора и безопасността на полета. Тяхната ефективност зависи от балансираното съчетаване на технологични решения, физиологични знания и човеко-центриран дизайн, насочен към поддържане на оптимално функционално състояние на пилота в условия на екстремно натоварване.

Интеграцията на физиологичните аларми в авиационната среда изисква подход, при който данните за функционалното състояние на пилота се обработват съвместно с бордовата информация и се представят в унифицирана предупредителна архитектура.

Това е илюстрирано на фиг. 42, интелигентната система за мониторинг осъществява двупосочен обмен на информация между физиологичните сензори, аналитичните алгоритми и авионичните интерфейси, като реализира адаптивно управление на алармите в зависимост от оперативния контекст. Този подход позволява ранно откриване на физиологична декомпенсация и подпомага поддържането на ситуационната осведоменост, без да увеличава когнитивното натоварване на пилота в критични фази на полета.



Фиг. 42. Интелигентната система за мониторинг на пилоти

6.1.5. Подводни и хипербарни условия.

Хипербарна физиология и медицински рискове

Подводната и хипербарната среда представляват едни от най-физиологично предизвикателните условия за човешкия организъм поради съчетанието на повишено околно налягане, променен газов състав на дихателната смес и ограничени възможности за незабавна медицинска интервенция. За разлика от авиационната и космическата среда, където доминират хипобарни ефекти, подводните условия се характеризират с прогресивно увеличаване

на хидростатичното налягане, което оказва директно влияние върху газообмена, нервната система и хемодинамиката.

Един от основните физиологични рискове е развитието на декомпресионна болест, възникваща вследствие на образуването на газови мехурчета в тъканите и кръвния ток при бързо понижаване на налягането. Механизмът е свързан с разтворимостта на инертните газове, предимно азот, които при хипербарни условия се акумулират в организма, а при декомпресия могат да доведат до съдови обструкции, възпалителни реакции и увреждане на централната нервна система. Клиничната картина варира от леки ставни болки до тежки неврологични и кардиореспираторни нарушения (Bennett & Elliott, 2003).

Азотната наркоза представлява друг съществен риск, особено при гмуркания на по-големи дълбочини. Тя се проявява с обратими, но потенциално опасни промени в когнитивните функции, включително нарушена концентрация, забавени реакции, еуфория и погрешна оценка на риска. Тези ефекти имат пряко отражение върху способността на водолазите и операторите да изпълняват сложни задачи и да реагират адекватно при аварийни ситуации. От функционална гледна точка азотната наркоза може да се разглежда като форма на фармакологично индуцирана когнитивна декомпенсация, чийто ефект се усилва при повишено психофизиологично натоварване (Edmonds et al., 2015).

Кислородната токсичност също представлява сериозен медицински риск в хипербарна среда, особено при използване на обогатени кислородни смеси или при хипербарна кислородна терапия. Повишеното парциално налягане на кислорода може да доведе до оксидативен стрес, засягащ централната нервна система и белодробния паренхим. Острите неврологични прояви включват зрителни нарушения, гадене, мускулни тремори и гърчове, които могат да имат фатални последици в подводна среда. Хроничната експозиция е свързана с възпалителни и дегенеративни процеси в белите дробове (Bennett & Elliott, 2003).

Допълнителни фактори, усложняващи хипербарната физиология, включват хипотермия, ограничена подвижност, повишено дихателно съпротивление и психологически стрес, свързан със затвореното пространство и ограничената видимост. Тези фактори действат синергично и могат да ускорят настъпването

на физиологична декомпенсация, особено при продължителни мисии или при оператори с недостатъчна адаптация и тренировка.

6.1.6. Технологични изисквания към системите за мониторинг и защита

Предвид описаните физиологични рискове, системите за медицински и физиологичен мониторинг в подводни и хипербарни условия следва да бъдат проектирани с изключително високи изисквания към надеждност, автономност и устойчивост на околната среда. Основно технологично предизвикателство представлява необходимостта от херметизация и защита от корозия, обусловена от продължителния контакт с морска вода и агресивни химични среди.

Сензорните системи трябва да осигуряват непрекъснато измерване на ключови физиологични параметри, включително сърдечна честота, дихателна честота, кислородна сатурация и показатели за термичен баланс.

Особено значение има мониторингът на газовите концентрации и парциалните налягания на дишащите смеси, което позволява ранно откриване на рискове, свързани с азотна наркоза, хипероксия или хипоксия. В този контекст интеграцията на физиологичните данни с информацията за дълбочина, налягане и профил на гмуркане е критична за адекватната оценка на риска.

Съвременните системи за подводен мониторинг все по-често използват алгоритми за оценка на тъканната газова сатурация и за прогнозиране на декомпресионния риск. Тези модели, базирани на физиологични и емпирични данни, позволяват динамична адаптация на декомпресионните процедури и намаляват вероятността от остри и късни усложнения. От особена важност е възможността за локална обработка на данните, тъй като комуникацията с повърхността често е ограничена, забавена или напълно недостъпна.

Важен елемент в дизайна на подобни системи е осигуряването на аварийна автономна реакция. Това включва автоматично задействане на защитни механизми, визуални или тактилни аларми за оператора и, при възможност, препоръки за корективни действия, като промяна на дихателната смес или корекция на профила на изплуване. В хипербарни обитаеми

структури и подводни апарати подобни системи могат да бъдат интегрирани с общата платформа за управление на жизнената среда.

В заключение, технологичните решения за мониторинг в подводни и хипербарни условия трябва да бъдат разглеждани като част от цялостна система за управление на риска, в която физиологичните, техническите и човешките фактори са тясно взаимосвързани. Само чрез подобен системен и превантивен подход може да се гарантира безопасността и оперативната ефективност на операторите в една от най-екстремните среди за човешка дейност.



Фиг. 43. Мониторинг на физиологичното състояние в хипербарна среда

Фиг. 43 илюстрира концептуална схема на система за мониторинг на физиологичното състояние на оператори в подводна и хипербарна среда. Представената архитектура обединява сензорни модули за измерване на жизнени показатели (сърдечна честота, дихателна честота, кислородна сатурация и телесна температура) с мониторинг на параметрите на околната среда, включително дълбочина, хидростатично налягане и газов състав на дихателната смес.

Системата осъществява локална обработка на данните с цел ранно откриване на физиологична декомпенсация, свързана с декомпресионна болест, азотна наркоза или кислородна токсичност. Интеграцията между физиологичните показатели и профила на гмуркане позволява динамична оценка на тъканната газова сатурация и прогнозиране на риска, дори при ограничена или липсваща комуникация с повърхността.

Фигурата подчертава необходимостта от автономни, херметизирани и устойчиви на корозия системи, които да осигуряват непрекъснат мониторинг и аварийни предупредителни функции в условия на екстремно налягане и ограничени възможности за медицинска интервенция.

6.1.7. Оператори на сложни технически системи. Когнитивно и психо-физиологично натоварване

Операторите на сложни технически системи, включително енергийни инсталации, транспортни мрежи, авиационни и космически платформи, функционират в среди, характеризиращи се с висока степен на технологична комплексност, продължително внимание и минимална толерантност към грешки. В тези условия човешкият фактор остава критичен елемент за безопасността и надеждността на системите, независимо от степента на автоматизация. Основно предизвикателство представлява поддържането на адекватна ситуационна осведоменост при наличие на големи обеми информация, времеви натиск и динамично променящи се условия на работа.

Когнитивното натоварване възниква като резултат от необходимостта за едновременно възприемане, интерпретиране и интегриране на множество информационни потоци, както и за вземане на решения с висока отговорност. При превишаване на индивидуалния когнитивен капацитет се наблюдава деградация на вниманието, работната памет и изпълнителните функции, което води до намаляване на точността и забавяне на реакциите. Подобни ефекти са особено критични в системи, където грешките могат да имат катастрофални последствия, като ядрена енергетика, управление на въздушното движение или контрол на космически апарати.

Хроничният психо-физиологичен стрес представлява допълнителен фактор, който усилва негативното въздействие на когнитивното натоварване. Продължителната експозиция на стресори – отговорност за безопасността, непрекъснат мониторинг, работа на смени и социална изолация – води до дисрегулация на автономната нервна система и до повишена уморяемост. В дългосрочен план това може да доведе до устойчиво понижаване на работоспособността, увеличена честота на грешки и нарушена способност за адекватна оценка на риска.

Концепцията за ситуационна осведоменост, формулирана от Mica R. Endsley, подчертава значението на три ключови нива: възприемане на релевантните елементи в средата, разбиране на тяхното значение и прогнозиране на бъдещото развитие на ситуацията. Когнитивното претоварване и стресът компрометират и трите нива, като водят до фрагментарно възприемане на информацията и до погрешни прогнози за развитието на събитията (Endsley, 1995). В този смисъл деградацията на ситуационната осведоменост може да се разглежда като централен механизъм, чрез който психо-физиологичните фактори влияят върху надеждността на операторите.

Наред с когнитивните аспекти съществено значение имат и физиологичните маркери на натоварване, като вариабилност на сърдечната честота, електродермална активност и мускулно напрежение. Тези показатели отразяват моментното функционално състояние на оператора и предоставят обективна информация за нивото на стрес и умора, която често не се осъзнава субективно. Интегрирането на подобни маркери в системите за мониторинг създава предпоставки за по-ранно откриване на рискови състояния и за превантивна намеса.

6.1.8. Адаптивна автоматизация и системи за подпомагане на оператора

В отговор на ограниченията на човешките когнитивни и физиологични ресурси, съвременните подходи в проектирането на сложни технически системи все по-често включват концепцията за адаптивна автоматизация. Този подход се основава на динамично разпределение на функциите между човека и автоматизираните

подсистеми в зависимост от текущото състояние на оператора и оперативния контекст.

Адаптивната автоматизация надхвърля традиционните статични модели, при които нивото на автоматизация е предварително фиксирано. Вместо това тя използва непрекъснат мониторинг на психо-физиологичните показатели на оператора, като вариабилност на сърдечната честота (HRV), електроенцефалографска активност (EEG) и електромиографски сигнали (EMG), за да оцени натоварването и готовността за изпълнение на задачите. При установяване на повишено когнитивно или физиологично натоварване системата може временно да поеме част от функциите, да опрости интерфейса или да промени начина на представяне на информацията.

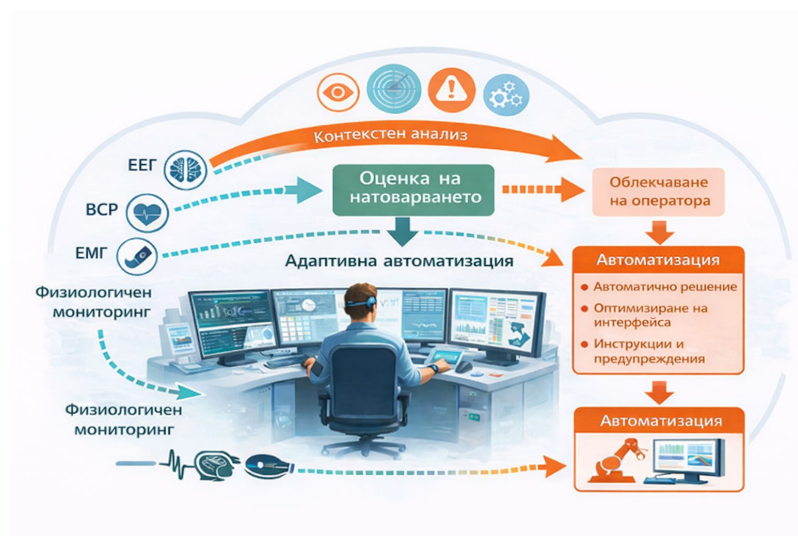
Изследванията на Raja Parasuraman и съавтори показват, че правилно реализираната адаптивна автоматизация може значително да намали вероятността от критични грешки и да подобри цялостната надеждност на човек–машинните системи (Parasuraman et al., 2000).

Ключов фактор за успеха на този подход е поддържането на адекватно ниво на ангажираност на оператора, така че да се избегнат явления като прекомерна зависимост от автоматиката или загуба на умения при продължително автоматизирано управление.

Системите за подпомагане на оператори следва да бъдат проектирани в съответствие с принципите на човеко-центрирания дизайн, като предоставят прозрачна информация за състоянието на автоматиката и логиката на нейните действия. Това е особено важно в критични ситуации, когато операторът трябва бързо да възстанови ръчен контрол и да вземе решения при непълна информация. Липсата на прозрачност може да доведе до недоверие към системата или до забавяне на реакциите, което компрометира безопасността.

В дългосрочен план интеграцията на адаптивна автоматизация с физиологичен мониторинг създава предпоставки за персонализирани системи, които отчитат индивидуалните особености на операторите, тяхната уморяемост и обученост. Подобен подход позволява не само реактивно управление на риска, но и проактивна оптимизация на работните режими, планирането на смените и обучителните програми.

На фиг. 44 е показана концептуална архитектура на система за адаптивна автоматизация, при която физиологичните и когнитивните показатели на оператора (EEG, вариабилност на сърдечната честота и електромиографска активност) се използват за оценка на текущото натоварване и контекстен анализ на работната среда. На базата на тази оценка се реализира динамично разпределение на функциите между човека и автоматизираните подсистеми с цел поддържане на оптимална ситуационна осведоменост и минимизиране на риска от човешка грешка при високооперативно натоварване.



Фиг. 44. Адаптивна автоматизация при оператори на сложни технически системи

В заключение, операторите на сложни технически системи представляват критичен компонент на съвременните високорискови инфраструктури. Ефективното управление на когнитивното и психофизиологичното натоварване чрез адаптивна автоматизация и интелигентни системи за подпомагане е ключово условие за

повишаване на безопасността, устойчивостта и ефективността на тези системи в условия на нарастваща технологична сложност.

6.1.9. Сравнителен анализ на екстремните среди

Екстремните среди, разгледани в настоящата глава – космическа, авиационна, подводна и средата на оператори на сложни технически системи – се различават съществено по физични параметри, оперативни ограничения и характер на рисковете. Въпреки това между тях съществуват ясно изразени концептуални и функционални сходства, които позволяват формулирането на общи изисквания към системите за физиологичен мониторинг и подпомагане на оператора.

Космическата среда се отличава с продължително въздействие на микрогравитация и йонизираща радиация, съчетано с изключително ограничени възможности за евакуация и медицинска намеса. Това налага разработването на високонадеждни, автономни и радиационно устойчиви системи, способни да функционират дългосрочно при минимални ресурси. Особено значение има локалната обработка на данни и възможността за самодиагностика и адаптация на системите.

Авиационната среда, макар и по-достъпна от гледна точка на комуникация и поддръжка, се характеризира с бързодинамични процеси, остри физиологични рискове и високи когнитивни изисквания към оператора. Хипоксията, G-натоварванията и натрупаната умора изискват системи с изключително кратко време за реакция и внимателно проектирани интерфейси, които минимизират когнитивното натоварване в критични фази на полета.

Подводната и хипербарната среда поставят акцент върху управлението на рискове, свързани с повишено налягане, газова токсичност и декомпресионни процеси. Тук доминират изискванията за херметичност, устойчивост на корозия и надежден мониторинг на газовия състав и физиологичното състояние. Ограничената комуникация с повърхността допълнително подчертава необходимостта от автономни решения и аварийни защитни механизми.

Средата на операторите на сложни технически системи, макар и да не е екстремна от физична гледна точка, представлява

критичен случай поради високия когнитивен и психо-физиологичен товар. Тук основният риск произтича от човешкия фактор – когнитивно претоварване, умора и стрес – което налага прилагането на адаптивна автоматизация и интелигентни системи за подпомагане на вземането на решения. Таблица 6.1 обобщава основните рискове и ключовите изисквания към системите в разгледаните екстремни среди.

Таблица 6.1. Сравнение на основните изисквания към системите в екстремни среди

Среда	Основни рискове	Ключови изисквания
Космос	Микрогравитация, радиация	Автономност, радиационна устойчивост
Авиация	Хипоксия, G-натоварвания	Бърз отговор, малки размери и тегло
Подводна среда	Хипербария, декомпресия	Херметичност, газов мониторинг
Оператори	Когнитивен стрес	Адаптивна автоматизация

6.1.10. Унифицирани принципи за проектиране на системи

Въпреки различията в условията на експлоатация, сравнителният анализ позволява извеждането на набор от унифицирани принципи за проектиране на системи за мониторинг и подпомагане на оператори в екстремни среди. Тези принципи представляват методологична рамка, приложима в широк спектър от приложения и технологии.

Първият фундаментален принцип е модулността, която осигурява гъвкавост при конфигуриране на системите и позволява адаптация към специфичните изисквания на всяка среда. Модулният подход улеснява подмяната, надграждането и калибрирането на отделни компоненти, без да се компрометира цялостната функционалност на системата.

Вторият ключов принцип е мултисензорното сливане, при което данни от различни физиологични сензори се интегрират в

единен аналитичен модел. Този подход повишава надеждността на оценката, позволява ранно откриване на латентни рискове и намалява вероятността от фалшиви аларми, характерни за едноканалните системи.

Локалната интелигентна обработка представлява трети съществен принцип, особено важен в среди с ограничена или забавена комуникация. Вградените алгоритми за анализ и прогнозиране позволяват системата да функционира автономно и да реагира своевременно на критични промени във физиологичното състояние или околната среда.

Централно място заема и човеко-центрираният дизайн, който отчита физиологичните, когнитивните и психосоциалните характеристики на оператора. Представянето на информацията следва да бъде адаптивно, контекстно зависимо и съобразено с текущото натоварване, за да се поддържа висока ситуационна осведоменост без допълнително когнитивно претоварване.

Сравнителният анализ подчертава значението на адаптивната автоматизация като обединяващ елемент между различните среди. Чрез динамично разпределение на функциите между човека и автоматиката, базирано на обективни физиологични показатели, този подход позволява не само реактивно управление на риска, но и проактивна оптимизация на работните процеси и безопасността.

Сравнителният анализ демонстрира, че независимо от спецификата на екстремната среда, успешните системи за мониторинг и подпомагане на операторите се основават на общи концептуални принципи. Тяхната последователна реализация създава предпоставки за повишаване на безопасността, устойчивостта и ефективността на човешката дейност в условия, при които границите на физиологичната и когнитивната адаптация са поставени на изпитание.

6.2. Методични подходи и експериментални протоколи

6.2.1. Проектиране на експериментални изследвания

Проектирането на експерименталните изследвания в областта на мониторинга на физиологичното и психо-физиологичното състояние

на човека оператор в екстремни условия представлява ключов етап, който определя научната валидност, приложимостта и възпроизводимостта на получените резултати (Hancock & Szalma, 2008; Parasuraman & Rizzo, 2007). Методичният подход следва да отчита спецификата на изследваната среда (космическа, авиационна, подводна, хипербарна), ограниченията на апаратурните системи, както и индивидуалните характеристики на изследваните оператори (Borghini et al., 2014).

Основен принцип при проектирането на експериментите е формулирането на ясно дефинирани цели и хипотези, които да бъдат проверими чрез количествени физиологични и психо-физиологични показатели (Fairclough, 2009). Изборът на показатели се извършва в съответствие с функционалните системи, подложени на най-значимо въздействие в конкретните условия – кардиоваскуларна, дихателна, нервна и мускулна система, както и интегралните механизми на автономната регулация (Cacioppo et al., 2017).

Експерименталният дизайн обикновено включва контролирани и експериментални условия, като при възможност се прилага вътреиндивидуален подход (within-subject design). Това позволява минимизиране на влиянието на междуиндивидуалната вариабилност и повишава чувствителността на анализа към настъпващите изменения в състоянието на оператора. В случаите, когато това е невъзможно, се използват хомогенни групи и подходящи статистически методи за контрол на смущаващите фактори (de Waard, 1996; Wilson & Russell, 2007).

Особено внимание се отделя на времевата структура на експериментите. Дългосрочните изследвания изискват протоколи за продължителен мониторинг, които да осигуряват стабилност на измерванията, минимален дискомфорт за оператора и ниска вероятност от отпадане на участници. В този контекст се предпочитат неинвазивни и носими сензорни технологии, интегрирани в автономни апаратурни системи.

6.2.2. Протоколи за наземни и полеви експерименти

Експерименталните протоколи се разработват с цел осигуряване на стандартизирани условия за измерване и сравнимост на резултатите между различни изследвания и среди (Vicente, 1999). В настоящата

монография се разграничават два основни типа протоколи: наземни (лабораторни) и полеви експерименти.

Наземните експерименти се провеждат в контролирана среда и позволяват прецизно управление на външните фактори – температура, осветеност, шум и времеви режим. Те се използват основно за:

- калибрация и валидация на сензорите и апаратурните системи;
- изследване на базовите физиологични и психофизиологични реакции;
- разработване и тестване на алгоритми за обработка и интерпретация на данните.

Типичният наземен протокол включва фаза на базово измерване (baseline), експериментална фаза с прилагане на контролирано натоварване (физическо, когнитивно или психоемоционално) и възстановителна фаза. Продължителността и интензитетът на натоварването се определят в зависимост от целите на изследването и характеристиките на изследваната група.

Полевите експерименти се провеждат в реални или близки до реалните експлоатационни условия – на борда на летателни апарати, в хипербарни камери, под вода или в симулирани космически среди. Тези протоколи имат по-висока екологична валидност, но са свързани с по-голяма неконтролируемост на външните фактори. Поради това те изискват:

- повишена надеждност и автономност на апаратурните системи;
- синхронизация на физиологичните данни с оперативните и средови параметри;
- детайлна документация на условията и събитията по време на експеримента.

Комбинирането на наземни и полеви протоколи позволява цялостна оценка на функционалното състояние на човека оператор и повишава обобщаемостта на получените резултати.

6.2.3. Оценка на надеждността и валидността на измерванията

Надеждността и валидността на измерванията са фундаментални изисквания към всеки експериментален подход в биомедицинските

и психо-физиологичните изследвания. Надеждността се отнася до степента на възпроизводимост и стабилност на измерванията при повторни измервания в сходни условия, докато валидността отразява доколко измерваният показател реално представя изследваното физиологично или психо-физиологично явление.

Оценката на надеждността включва анализ на:

- вътрешната консистентност на измерванията;
- тест–ретест на надеждността;
- устойчивостта на измерванията при продължителен мониторинг.

За тази цел се използват статистически показатели като коефициент на вариация, вътрешнокласов корелационен коефициент (ICC) и анализ на времеви дрейф на сигналите. При многоканални системи се извършва и оценка на синхронността и съгласуваността между различните канали.

Валидността на измерванията се оценява чрез сравнение с утвърдени референтни методи и показатели (критериална валидност), както и чрез анализ на теоретичната обосновааност на връзката между измервания сигнал и изследваното състояние (конструктивна валидност). В условията на екстремни среди особено значение има екологичната валидност, която отразява приложимостта на резултатите в реални експлоатационни ситуации.

Комбинирането на няколко независими показателя и използването на интегрални индекси допълнително повишава надеждността и валидността на оценката на функционалното състояние на човека оператор.

6.2.4. Обработка и интерпретация на резултатите

Обработката на експерименталните данни представлява многоетапен процес, включващ предварителна обработка на сигналите, извличане на информативни параметри, статистически анализ и интерпретация в контекста на изследваните условия. Предварителната обработка цели отстраняване на шум, артефакти от движение и базов дрейф чрез прилагане на цифрови филтри и алгоритми за корекция.

Следващият етап включва извличане на параметри във времевата, честотната и времево-честотната област, в зависимост от

характера на сигнала. Получените параметри се подлагат на статистически анализ с цел идентифициране на значими изменения, корелации и тенденции, свързани с натоварването, адаптацията и умората на оператора.

Интерпретацията на резултатите се извършва в рамките на системния подход „човек–машина–среда“, като се отчита комплексното взаимодействие между физиологичните реакции, психо-физиологичните процеси и оперативните изисквания. Особено внимание се отделя на индивидуалните различия и динамиката на адаптационните процеси, което налага използването на персонализирани критерии и прагове за оценка.

В заключение, методичните подходи и експерименталните протоколи, представени в тази глава, формират основата за научно обоснована и практически приложима оценка на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор в екстремни условия. Те осигуряват необходимата връзка между инженерното проектиране на апаратурните системи и интерпретацията на получените резултати в контекста на реалните експлоатационни задачи.

6.3. Тенденции и перспективи за развитие

6.3.1. Миниатюризация и интелигентни сензори

Миниатюризацията на сензорните и апаратурните системи представлява една от водещите и най-динамично развиващи се тенденции в областта на мониторинга на физиологичното и психо-физиологичното състояние на човека оператор. Този процес е пряко обусловен от напредъка в микро- и наноелектрониката, развитието на MEMS технологии, интеграцията на системи върху чип (SoC), както и от значителното повишаване на енергийната ефективност на съвременните електронни компоненти (Patel et al., 2012; Bonato, 2010). В резултат на това става възможно създаването на компактни, леки и нискоенергийни сензорни устройства, които могат да функционират продължително време в условия на ограничени ресурси и повишени изисквания за надеждност.

Миниатюризацията има ключово значение при приложения, свързани с екстремни среди, където масата, обемът и енергийната

консумация на апаратурата са строго ограничени. В космическите и авиационните мисии всяко допълнително натоварване на оператора или на бордовите системи увеличава риска от откази и снижава общата ефективност на мисията. По тази причина сензорните системи за мониторинг трябва да бъдат не само миниатюрни, но и ергономично интегрирани в облеклото, оборудването или личните аксесоари на оператора, без да възпрепятстват изпълнението на оперативните задачи (Borghini et al., 2014).

Съвременните интелигентни сензори надхвърлят ролята на пасивни измервателни елементи и все по-често включват локална обработка на сигнала, автоматична калибрация и адаптивно управление на режимите на работа. Интеграцията на микропроцесори и цифрови сигнални процесори директно в сензорния модул позволява предварителна филтрация на шума, детекция на артефакти и извличане на информативни параметри още на ниво „edge processing“. Това значително намалява обема на предаваните данни, понижава енергийната консумация и повишава устойчивостта на системата при ограничена или прекъсната комуникация със централния анализиращ модул (Mehta & Parasuraman, 2013).

Особено показателен пример за практическата реализация на тези тенденции са носимите устройства от типа „умни часовници“, които обединяват в изключително компактен форм-фактор множество физиологични сензори – за сърдечна честота, вариабилност на сърдечния ритъм, електрокардиография, кислородна сатурация, кожна температура и двигателна активност.



Фиг. 45. Носим интелигентен сензор за измерване на сърдечна честота

Макар първоначално разработени за масовия потребител, тези устройства все по-често се разглеждат като технологична платформа за професионален мониторинг, включително в авиацията, подводната дейност и дългосрочните космически мисии. Тяхното основно предимство е високата степен на интеграция, непрекъснатият мониторинг и минималното въздействие върху оператора.

В подводна и хипербарна среда миниатюризацията на сензорите допринася не само за повишен комфорт, но и за подобряване на механичната устойчивост и безопасността на системите. Намаляването на размерите и броя на външните кабели ограничава риска от механични повреди и улеснява херметизацията на устройствата при работа под повишено налягане (Peck et al., 2019). В тези условия особено важно е използването на сензори с висока дългосрочна стабилност и нисък температурен дрейф, което допълнително насочва развитието към интегрални и твърдотелни решения.

Очаква се бъдещото развитие на миниатюризираните сензорни системи да бъде насочено към създаване на мултимодални платформи, които обединяват физиологични, биомеханични и

средови измервания в единна архитектура. Такива системи позволяват комплексна оценка на функционалното състояние на човека оператор, като съпоставят вътрешните физиологични реакции с външните условия и оперативното натоварване (Mehta & Parasuraman, 2013). Комбинацията от миниатюризация, интелигентна обработка и мултисензорна интеграция формира технологичната основа за следващото поколение системи за мониторинг в екстремни среди.

6.3.2. Изкуствен интелект и машинно обучение в анализа

Приложението на методи от областта на изкуствения интелект (Artificial Intelligence, AI) и машинното обучение (Machine Learning, ML) представлява качествено нов етап в анализа и интерпретацията на физиологични и психо-физиологични данни. За разлика от класическите статистически подходи, които обикновено разчитат на линейни модели и предварително дефинирани зависимости, съвременните ML алгоритми предоставят възможност за автоматично откриване на нелинейни връзки, сложни взаимовръзки между параметрите и латентни структури в големи масиви от данни (Bishop, 2006; Lotte et al., 2018). Това е особено важно при мониторинга на човека оператор, където физиологичните реакции често са многофакторни, динамични и силно индивидуално обусловени.

6.3.3. AI-базирани подходи за анализ на физиологични и психо-физиологични сигнали

Физиологичните сигнали като електроенцефалограма (EEG), електрокардиограма (ECG), вариабилност на сърдечния ритъм (HRV), кожно-гальванична реакция и показатели за двигателна активност се характеризират с висока размерност, нестационарност и чувствителност към шум и артефакти. В този контекст ML алгоритмите намират приложение на няколко нива на анализа:

- автоматизирана предварителна обработка и детекция на артефакти;
- извличане на информативни характеристики във времевата, честотната и времево-честотната област;

- класификация на функционални състояния като умора, стрес, когнитивно претоварване и понижена бдителност;
- прогнозиране на бъдещи изменения в работоспособността.

Особено перспективни са дълбоките невронни мрежи (deep neural networks), които могат да работят директно със сурови или слабо обработени сигнали и да извличат йерархични представяния на данните (Roy et al., 2019). Ансамбловите методи, комбиниращи няколко модела, допълнително повишават надеждността и устойчивостта на анализа при вариабилни условия на измерване.

6.3.4. AI в системите за мониторинг на човека оператор

В контекста на човека оператор AI-базираните системи се използват за:

- автоматична класификация на текущото функционално и психо-физиологично състояние;
- ранно откриване на неблагоприятни тенденции, предшестващи критично понижаване на работоспособността;
- адаптивно управление на интерфейса „човек машина“, включително динамично разпределение на задачите и натоварването.

Тези възможности са от особено значение в авиационната, космическата и подводната дейност, където грешките на оператора могат да имат сериозни последици. AI алгоритмите позволяват преминаване от реактивен към проактивен подход, при който системата не само отчита настъпили изменения, но и прогнозира риска от бъдещи откази или грешки (Hancock & Szalma, 2008).

6.3.4. Концепция за интелигентна апаратура от типа BeON-1

Апаратурните системи от типа BeON-1 могат да бъдат разглеждани като следващо поколение интелигентни платформи за мониторинг, които съчетават миниатюризирани мултисензорни модули с вградени AI алгоритми за анализ в реално време. В рамките на такава концепция основните функции на изкуствения интелект включват:



Фиг. 46. Адаптирана схема на AI-базирана система за мониторинг и подпомагане на вземането на решения при оценка психо-физиологичното състояние на човека оператор

- интеграция и синхронизация на данни от различни физиологични канали;
- автоматизирано извличане на ключови показатели и индекси;
- формиране на комплексна оценка на функционалното състояние;
- генериране на обобщени резултати и препоръки след приключване на тестовите.

Особено важен аспект е възможността AI модулът да функционира автономно по време на експериментите или оперативната дейност, като същевременно съхранява пълния набор от данни за последващ задълбочен анализ. Това е критично при космически мисии с ограничена комуникация със Земята, където системите трябва да поддържат висока степен на самостоятелност (Clément & Ngo-Anh, 2013).

6.3.5. Хибриден модел: AI + експертна оценка

Въпреки значителния потенциал на AI и ML, тяхното приложение в областта на психо-физиологичния мониторинг не следва да се разглежда като пълна замяна на експертната оценка. Напротив, най-перспективен е хибридният модел, при който резултатите,

генерирани от интелигентната система, се подлагат на финално одобрение и интерпретация от специализиран психолог и лекар.

В този модел:

- AI системата осигурява обективност, повторяемост и висока чувствителност към слаби промени в сигналите;
- експертите добавят клиничен и психологичен контекст, отчитат индивидуалната история и специфичните условия на експеримента;
- крайната оценка съчетава предимствата на автоматизирания анализ и човешката интерпретация.

Подобен подход е особено подходящ за приложения с висока отговорност, като подбор и мониторинг на екипажи за космически мисии, авиационен персонал и оператори в подводни или хипербарни среди. Той също така отговаря на етичните и регулаторните изисквания за използване на AI в медицината и психологията, като запазва водещата роля на човешкия експерт.

В бъдеще се очаква интеграцията на AI в апаратура от типа BeON-1 да бъде насочена към:

- самообучаващи се модели, адаптирани към конкретния оператор;
- непрекъснато усъвършенстване на алгоритмите чрез акумулиране на данни от продължителни наблюдения в тясна интеграция със системите за управление на мисии и поддръжка на живота.

Тези тенденции превръщат изкуствения интелект от инструмент за анализ в активен компонент на системата „човек–машина–среда“, с потенциал съществено да повиши безопасността, ефективността и устойчивостта на човешката дейност в екстремни условия.

6.3.6. Персонализиран мониторинг на човека оператор

Съвременните изследвания ясно показват, че реакциите към натоварване, стрес и екстремни условия са силно индивидуално специфични. Това налага преход от универсални прагове и критерии към персонализирани модели за оценка на функционалното състояние (*Parasuraman & Rizzo, 2007; Fairclough, 2009*).

Персонализираният мониторинг се базира на:

- индивидуални базови нива (baseline);
- адаптивни алгоритми за интерпретация;
- дългосрочно проследяване на динамиката на показателите.

Този подход е особено важен при високорискови дейности като пилотиране на летателни апарати, космически мисии и дълбоководно гмуркане, където индивидуалните адаптационни ресурси могат да бъдат решаващи за безопасността (*Hancock & Szalma, 2008*). Интеграцията на персонализирани модели с AI системи създава предпоставки за проактивен контрол и превенция на критични състояния (*Mehta & Parasuraman, 2013*).

6.3.7. Бъдещи космически мисии и нови изисквания

Планираните дългосрочни космически мисии, включително пилотирани полети отвъд ниска околоземна орбита, постоянно човешко присъствие около Луната и бъдещи експедиции до Марс поставят качествено нови изисквания към системите за мониторинг на човека оператор. За разлика от досегашните мисии в ниска орбита, тези сценарии се характеризират с продължителна автономност, ограничени възможности за бърза евакуация и значително по-голяма зависимост от вътрешните ресурси на космическия апарат. В този контекст системите за мониторинг на физиологичното и психо-физиологичното състояние се превръщат в критичен елемент за безопасността и успеха на мисията (*Clément et al., 2020*).

Продължителното пребиваване в условия на микрогравитация води до комплексни промени в организма на човека оператор, включително мускулна атрофия, намалена костна плътност, промени в кардиоваскуларната регулация и адаптация на вестибуларната система. Паралелно с това хроничната изолация, ограниченото социално взаимодействие и високата когнитивна натовареност оказват съществено въздействие върху психичното състояние, вниманието и вземането на решения. Тези фактори изискват непрекъснат и интегриран мониторинг, който да отчита както физиологичните, така и психо-физиологичните аспекти на работоспособността.

Особено значение в бъдещите мисии придобива интеграцията на системите за мониторинг с бордовите системи за

поддръжка на живота. Данните за сърдечна дейност, дишане, метаболитни показатели и психо-физиологичен статус могат да се използват не *само* за оценка на здравето, но и за адаптивно управление на параметри като газов състав на атмосферата, температурен режим, осветление и режими на почивка. По този начин мониторингът на човека оператор се превръща в активен компонент на цялостната система „човек–кораб–среда“, а не в изолиран диагностичен инструмент.

Минималната нужда от човешка намеса е друг ключов фактор, който определя архитектурата на бъдещите системи. Поради ограниченията в комуникацията със Земята и значителните закъснения при дълбокосмически мисии, анализът на данните и вземането на решения трябва да се осъществяват в голяма степен автономно. Това налага използването на интелигентни алгоритми, способни да оценяват състоянието на екипажа в реално време, да откриват ранни признаци на неблагоприятни тенденции и да предлагат адекватни коригиращи мерки без необходимост от постоянна външна експертна намеса.

Устойчивостта на апаратурата към радиационно натоварване и екстремни температурни вариации представлява допълнително предизвикателство. В условията на дълбокия космос електронните компоненти са подложени на повишени нива на йонизираща радиация, което може да доведе до деградация на сензорите, грешки в обработката на данните и откази на системите. Поради това бъдещите платформи за мониторинг трябва да бъдат проектирани с повишена отказоустойчивост, резервираност и възможност за самодиагностика и адаптация.

В този контекст мониторингът на човека оператор постепенно се трансформира от средство за пасивно наблюдение в активен елемент на управлението на мисията, подпомагащ планирането на задачите, разпределението на натоварването и управлението на риска (Kanas & Manzey, 2008). Информацията за функционалното състояние на екипажа може да бъде използвана за динамично адаптиране на графици, избор на оптимални моменти за критични операции и предотвратяване на човешки грешки в условия на повишено натоварване.

Подобни тенденции се наблюдават и в развитието на автономни авиационни и подводни системи с висока сложност и

продължителност на експлоатация, където човекът оператор остава ключов елемент, но функционира в тясна интеграция с интелигентни технически системи (Vicente, 1999). Опитът от тези области предоставя ценни методологични и технологични решения, които могат да бъдат адаптирани и приложени в бъдещите космически мисии.

В заключение, бъдещите космически мисии изискват ново поколение системи за мониторинг на човека оператор, характеризиращи се с висока автономност, интелигентност и интеграция с бордовите системи. Тези системи ще играят ключова роля не само за поддържане на здравето и работоспособността на екипажа, но и за цялостното управление и успеха на мисиите в дълбокия космос.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия монографичен труд са разгледани и внедрени в продължение четиридесет години множество апарати за психофизиологични изследвания, които са разгледани подробно в Глава 5. **Степен на приложение и внедряване на разработените апаратури**

Разгледаните в настоящата монография апаратурни системи представляват реално реализирани и експлоатирани инженерни решения, преминали през пълен цикъл на разработване, верификация и практическо използване. В зависимост от предназначението и средата на експлоатация тези системи покриват широк спектър от нива на приложение – от дългосрочна работа в космическа среда до текущо използване в националната здравна мрежа.

1. Дългосрочна експлоатация в космическа среда

Апаратурните системи ССОД „Зора“ и NEUROLAB-B (Невролаб – Б) са проектирани и използвани за продължителна експлоатация в условията на космически полет. Всяка от тях е функционирала в орбитална среда в продължение на повече от четири години.

Тази експлоатация представлява изключително високо ниво на инженерна верификация и включва работа при:

- микрогравитация;
- повишено радиационно натоварване;
- ограничени възможности за поддръжка и ремонт;
- строги изисквания за надеждност и отказоустойчивост.

Продължителната и стабилна работа на тези системи в космоса потвърждава зрелостта на хардуерната и софтуерната архитектура, както и адекватността на прилаганите инженерни решения. Подобно ниво на експлоатация значително надхвърля стандартните лабораторни и експериментални приложения и представлява силно доказателство за практическата стойност на разработките.

2. Приложно използване в здравната система

Други разработени апаратурни решения, включително Холтер ER02, MA1 и BeON-1, са внедрени и към момента функционират в рамките на здравната мрежа на страната. Тези системи се използват за:

- продължителен физиологичен и психо-физиологичен мониторинг;
- диагностични и оценъчни процедури;
- подпомагане на клинични и функционални изследвания.

Експлоатацията в реална здравна среда налага високи изисквания по отношение на надеждност, повторяемост на измерванията, удобство за персонала и съвместимост със съществуващите диагностични практики. Фактът, че тези системи се използват в текущата практика, демонстрира тяхната функционална пригодност и инженерна устойчивост.

3. Инженерна обобщаваща оценка

Комбинирането на дългосрочна космическа експлоатация и текущо приложение в здравната система представлява рядко срещано и особено силно доказателство за зрелостта на разгледаните апаратни решения. То показва, че разработките не са ограничени до единична среда или приложение, а притежават висока степен на адаптивност и надеждност.

Този спектър на внедряване – от орбитална среда до клинична практика – е пряко следствие от системния инженеринг, заложен в хардуерната и софтуерната архитектура на апаратурите, както и от последователния подход към тяхното развитие и поддръжка.

4. Системен принос в проектирането на апаратурни комплекси

Формулиран и реализиран е системен подход за проектиране на апаратни комплекси за психо-физиологичен мониторинг, обединяващ:

- избор и интеграция на физиологични сензори;
- разработване на хардуерни измервателни модули;
- изграждане на многоканални системи за синхронно събиране на данни;
- разработване на специализиран софтуер за управление, визуализация и анализ.

Този подход е приложен последователно при разработката на редица апаратни решения, включително системите *ССОД-Зора*, *NEUROLAB-B*, *BeON-1* и други, като във всички случаи авторът е изпълнявал ролята на водещ инженер.

5. Оригинални инженерни решения в хардуерната архитектура

Предложени и реализирани са оригинални инженерни решения в областта на хардуерната архитектура на психо-физиологични системи, включващи:

- проектиране на нискошумови аналогови фронт-енд модули за регистриране на слаби биосигнали;
- осигуряване на електрическа и функционална изолация между измервателните канали;
- оптимизация на енергийната ефективност и отказоустойчивостта на системите;
- адаптация на апаратурата за работа в екстремни условия (космически, авиационни, подводни).

Тези решения са насочени към повишаване на надеждността, точността и възпроизводимостта на измерванията и са валидирани чрез реална експлоатация в научни и приложни изследвания.

6. Принос в разработването на специализиран софтуер

Съществен принос представлява разработването на специализиран софтуер за управление и обработка на психо-физиологични данни, включващ:

- софтуер за управление на хардуерните модули и синхронизация на измерванията;

- алгоритми за предварителна обработка, филтрация и детекция на артефакти;
- средства за визуализация и интерактивен анализ на многоканални сигнали;
- архитектура за модулно разширяване и адаптация към различни експериментални протоколи.

7. Методичен принос в експерименталните протоколи

Авторът има принос и в разработването на методични подходи и експериментални протоколи, включително:

- проектиране на наземни и полеви експерименти;
- избор на физиологични показатели и критерии за оценка;
- оценка на надеждността и валидността на измерванията;
- интерпретация на резултатите в контекста на системата „човек–машина–среда“.

Тези методични решения осигуряват възпроизводимост и приложимост на получените резултати в реални експлоатационни условия.

8. Обобщаващ принос

В обобщение, основният принос на настоящата работа се състои в цялостното интегриране на инженерни, софтуерни и методични решения за мониторинг на човека оператор, като авторът е участвал като водещ инженер във всички разгледани апаратни разработки. Представените решения надграждат съществуващите подходи и формират основа за бъдещо развитие на интелигентни системи за мониторинг в екстремни условия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Buckey, J.C. (2006). *Space physiology*. New York: Oxford University Press.
2. Clément, G. (2011). *Fundamentals of space medicine*. New York: Springer.
3. Stoyan Tanev, Plamen Trendafilov, Hristo Hristov, Svetlin Doshev, Blaga Rousseva and Dimitar Baturov; Scientific Research Complex “BeOn-1” Performance Indicator of the Operators in Extreme Conditions. *Journal of Earth Science and Engineering* 4 (2014) 675–683, doi: 10.17265/2159-581X/2014.11.003
4. S. Tanev, P. Genov, A., Petkov, P., Trendafilov. Algorithm to clear the noises from electrocardiographic signals. 68–73 pages, Science session, 2005, D. Mitropolia.
5. S. Tanev, P. Genov, A, Petkov, P, Trendafilov. Computer visualization of the results from heart rate variability processing. 60–68 pages, Science session, 2005, D.Mitropolia
6. S.,Tanev, S., P. Genov, A., Petkov, P., Trendafilov. Computer processing and analysis of electrocardiographic signals. 338–344 pages. Scientific Conference SENS-2005. Varna 2005.
7. S.,Tanev, S., Pl. Trendafilov, P. Genov. About complex spectral analysis of the heart rate variability. CD, Second Science conference SENS 2006, Varna, 2006.
8. S.,Tanev, S., Pl. Trendafilov, P. Genov. Construction and development perspectives of the national telemedicine system. 93–97 pages. National congress of aviation marine and space medicine, 2007,Varna.
9. S.,Tanev, P., Trendafilov, P. Genov. Method and Device for Measuring the oxyhaemoglobin and the irrigation of the peripheral tissues. 70–74 pages. IV Scientific Conference SENS 2008. Varna 2008.

10. S.,Tanev, P.,Trendafilov, P. Genov. Fast algorithm for detection of normal and pathological events in long time electrocardiogram,s records. “Space Research in Bulgaria”, No.22, Sofia 2009.
11. Clément, G. and Reschke, M.F. (2010). *Neuroscience in space*. New York: Springer.
12. Convertino, V.A. (1996). Clinical aspects of the cardiovascular response to microgravity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28(10), pp. 999–1006.
13. Di Rienzo, M., Rizzo, G., Parati, G., Castiglioni, P., and Montano, N. (2013). Assessment of autonomic function in space: Challenges and methods. *European Journal of Applied Physiology*, 113(9), pp. 2319–2335.
14. Fitts, R.H., Riley, D.R. and Widrick, J.J. (2010). Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *Journal of Experimental Biology*, 213(1), pp. 44–55.
15. Flynn-Evans, E.E., Wright, K.P., Mullington, J.M. and Czeisler, C.A. (2016). Circadian and wake-dependent influences on subjective sleepiness, cognitive throughput, and reaction time performance in spaceflight. *Journal of Biological Rhythms*, 31(4), pp. 314–326.
16. Даскалов И, Стамболиев И (1978): Електромедицинска диагностична техника’, *Техника*, С.
17. Илиев ИЦ (1996): ‘Система за дълговременно регистриране на кръвно налягане’, *Дисертация*, Технически Университет –София.
18. Левков Ч., Михов Г., Иванов Р., Даскалов И (1980); ‘Метод и устройство за елиминирание на смущения с мрежова честота при анализ на биосигнали’, Авторско свидетелство No 48328.
19. Михов Г. (1983): „Програмно автоматизирани електронни устройства за обработка и визуализация на електрокардиосигнали“, *Дисертация*.

20. Ненова ДН-Б (2011): 'Установяване на наличие на сърдечна дейност при екстремни ситуации', *Дисертация* Технически Университет – София.
21. Николова Р. (2008): 'Времето на разпространение на пулсовата вълна – метод за изследване на функционалния статус на сърдечно-съдовата система', *Български Медицински Журнал*, **2** (1), 9–13.
22. Томов И, Томов Л. (1972): 'Ритъмни нарушения на сърдечната дейност', *Медицина и Физкултура*, С.
23. Томов И, Томов Л. (1975): 'Клинична електрокардиография и вектрокардиография', *Медицина и Физкултура*, С.
24. Томпкинс У, Уэбстер Д., ред. (1985): 'Микрокомпютерные медицинские системы. Проектирование и применение', (превод от английски), *Мир*, М.
25. Христов ИИ (1988): 'Възприемане, обработка и регистриране на електрокардиосигнали чрез микропроцесорни устройства', *Дисертация*.
26. Памукова-Майкълсън, Р. 2024, Третата вълна: иновации в медицината на постиндустриалното общество. Изобретения, трансфер, иновации, бр. 1(32), с. 38—46, ISSN 1313—9657
27. Healey, J.A. and Picard, R.W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(2), pp. 156–166.
28. Kanas, N. and Manzey, D. (2008). *Space psychology and psychiatry*. 2nd ed. Berlin: Springer.
29. Liao, L.D., Chen, C.H., Chen, S.F., Chang, J.Y., Lin, C.T., and Chao, C.F. (2012). Biosensor and intelligent system for monitoring human operator in extreme environments. *Sensors*, 12(12), pp. 17277–17303.
30. Matthews, G., Davies, D.R., Westerman, S.J. and Stammers, R.B. (2014). *Human performance: Cognition, stress, and individual differences*. London: Psychology Press.

31. Nicogossian, A.E., Williams, R.S., Huntoon, C.L., Doarn, C.R., Polk, J.D. and Schneider, V.S. (2016). *Space physiology and medicine*. 4th ed. New York: Springer.
32. Parasuraman, R., Sheridan, T.B. and Wickens, C.D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(2), pp. 140–160.
33. Parasuraman, R. and Rizzo, M. (2007). *Neuroergonomics: The brain at work*. Oxford: Oxford University Press.
34. Prisk, G.K. (2014). Respiratory physiology in space. *Comprehensive Physiology*, 4(1), pp. 251–287.
35. Shaffer, F. and Ginsberg, J.P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, Article 258.
36. Warm, J.S., Parasuraman, R. and Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 50(3), pp. 433–441.
37. Wickens, C.D., Lee, J.D., Liu, Y. and Becker, S.E.G. (2015). *An introduction to human factors engineering*. 2nd ed. Boston: Pearson.
38. Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 28(3), R1–R39.
39. Boric-Lubecke, O., Lubecke, V. M., Host-Madsen, A., & Samardzija, D. (2008). Wireless sensing of multiple heartbeats at a distance. *IEEE Microwave Magazine*, 9(1), 91–97.
40. De Luca, C. J. (1997). The use of surface electromyography in biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 135–163.
41. Griffin, M. D., & French, J. R. (2004). *Space Vehicle Design*. AIAA.
42. ISO 13485:2016. Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes.
43. Khandpur, R. S. (2014). *Handbook of Biomedical Instrumentation*. McGraw-Hill.

44. Malmivuo, J., & Plonsey, R. (1995). *Bioelectromagnetism*. Oxford University Press.
45. Merletti, R., & Parker, P. (2004). *Electromyography*. Wiley-IEEE Press.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley.
46. Pallàs-Areny, R., & Webster, J. G. (2001). *Sensors and Signal Conditioning*. Wiley.
47. Sörnmo, L., & Laguna, P. (2005). *Bioelectrical Signal Processing*. Elsevier.
48. Webster, J. G. (2010). *Medical Instrumentation: Application and Design*. Wiley.
49. Wertz, J. R., Everett, D. F., & Puschell, J. J. (2011). *Space Mission Engineering: The New SMAD*. Microcosm Press.
50. Bennett, P. B., & Elliott, D. H. (2003). *The Physiology and Medicine of Diving*. Saunders.
51. Caldwell, J. A., et al. (2009). Fatigue in aviation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80(1), 29–59. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2435.2009>
52. Chancellor, J. C., et al. (2014). Space radiation and cognition. *Life Sciences in Space Research*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2014.01.003>
53. Clément, G., & Buckley, A. (2019). *Artificial Gravity*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9895-5>
54. Cucinotta, F. A., & Durante, M. (2006). Cancer risk from space radiation. *The Lancet Oncology*, 7(5), 431–435. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(06\)70695-7](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(06)70695-7)
55. Edmonds, C., et al. (2015). *Diving and Subaquatic Medicine*. CRC Press.
56. Endsley, M. R. (1995). Situation awareness. *Human Factors*, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>

57. Kanas, N., & Manzey, D. (2008). *Space Psychology and Psychiatry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6770-9>
58. LeBlanc, A., et al. (2000). Bone loss after space flight. *Journal of Bone and Mineral Research*, 15(6), 113–120. <https://doi.org/10.1359/jbmr.2000.15.6.113>
59. Parasuraman, R., et al. (2000). Adaptive automation. *Human Factors*, 42(2), 286–298. <https://doi.org/10.1518/001872000779656501>
60. Wickens, C. D., et al. (2015). *Engineering Psychology and Human Performance*. Pearson.
61. Borghini G, Aricò P, Di Flumeri G, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014.
62. Cacioppo JT, Tassinary LG, Berntson GG. *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press; 2017.
63. Fairclough SH. Fundamentals of physiological computing. *Interacting with Computers*. 2009.
64. Hancock PA, Szalma JL. *Performance under Stress*. Ashgate; 2008.
65. Mehta RK, Parasuraman R. Neuroergonomics. *Front Hum Neurosci*. 2013. Parasuraman R, Rizzo M. *Neuroergonomics: The Brain at Work*. Oxford University Press; 2007.
66. Patel S, et al. Wearable sensors in human monitoring. *J Neuroeng Rehabil*. 2012.
67. Stergiou N. *Innovative Analyses of Human Movement*. Human Kinetics; 2004.
68. Vicente KJ. *Cognitive Work Analysis*. Lawrence Erlbaum; 1999.
69. Wilson GF, Russell CA. Psychophysiological workload assessment. *Hum Factors*. 2007.
70. Bishop CM. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer; 2006.

71. Bonato P. Advances in wearable technology and applications. *IEEE Eng Med Biol Mag.* 2010.
72. Borghini G, Aricò P, Di Flumeri G, et al. Neurophysiological monitoring in pilots and drivers. *Neurosci Biobehav Rev.* 2014.
73. Clément G, Ngo-Anh TJ. Space physiology and human performance. *Acta Astronaut.* 2013.
74. Clément G, Bukley A, Paloski WH. *Fundamentals of Space Medicine.* Springer; 2020.
75. Fairclough SH. Fundamentals of physiological computing. *Interacting with Computers.* 2009.
76. Hancock PA, Szalma JL. *Performance under Stress.* Ashgate; 2008.
77. Kanas N, Manzey D. *Space Psychology and Psychiatry.* Springer; 2008.
78. Lotte F, et al. A review of classification algorithms for EEG-based BCIs. *J Neural Eng.* 2018.
79. Mehta RK, Parasuraman R. Neuroergonomics. *Front Hum Neurosci.* 2013.
80. Parasuraman R, Rizzo M. *Neuroergonomics: The Brain at Work.* Oxford University Press; 2007.
81. Patel S, et al. Wearable sensors for human monitoring. *J Neuroeng Rehabil.* 2012.
82. Roy Y, et al. Deep learning-based electroencephalography analysis. *J Neural Eng.* 2019.
83. Vicente KJ. *Cognitive Work Analysis.* Lawrence Erlbaum; 1999.
84. Yun-Chi Yeh, Wen-June Wang (2008): 'QRS complexes detection for ECG signal: The Difference Operation Method', *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 91(3), pp. 245–254.

Стоян Танев

СЕНЗОРИ И АПАРАТНИ СИСТЕМИ
ЗА ОЦЕНКА НА ФИЗИОЛОГИЧНОТО
И ПСИХО-ФИЗИОЛОГИЧНОТО СЪСТОЯНИЕ
НА ЧОВЕКА ОПЕРАТОР
В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ

Българска
Първо издание

Рецензенти:

Проф. д-тн Гаро Мардиросян

Проф. д-р Павел Пенев

Редактор *Верислава Бенова*

Художник на корицата *Стоян Танев*

Формат 60/90/16

Печатни коли 11,63

Печатница на Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“
1113 София, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 5

www.press.bas.bg

ISBN 978-619-245-635-1



ISBN 978-619-245-635-1