

**Технологично училище “Електронни системи”
към Технически университет - София**



Cerebralink

Курсова работа по
“Вградени микрокомпютърни системи”

Автор:
Мартин Наков

Научен ръководител:
Росен Витанов

СОФИЯ
2023

Увод

Човешкото тяло е един много впечатляващ, но също така и сложно устроен механизъм. Дори след тежки травми и заболявания, то пак може да се възстанови или поне да минимизира щетите, нанесени от инцидента, който е преживяло. Това негово свойство на *регенерация* обаче не гарантира пълното възстановяване на телесните функции, засегнати от заболяването.

Редица здравословни състояния директно засягат моторната функционалност на човешкото тяло (т.е. способността му да управлява/ръководи мускулните си органи), най-често чрез указване щети на централната нервна система (мозък и гръбначен мозък). Мозъкът сам по себе си е много сложен орган, както и трудно възстановяващ се. Той подлежи на изключително тежки заболявания, които най-често се оказват пагубни за човека, който страда от тях, довеждайки до голям брой увреждания: *затруднения при говор, загуба на усещане (или дори моторна функционалност) в части на тялото, парализа (пълна загуба на моторната функционалност на тялото) и т.н.*

Cerebralink се явява **неврокомпютърен интерфейс (НКИ; на англ. BCI - Brain-Computer Interface)**. Целта му е да може да възстанови възможно най-много загубена психическа или физическа функционалност, предоставяйки интерфейс, чрез който човешкият мозък може да обменя информация (най-често чрез своята **Мозъчна Електрическа Активност - МЕА**) с електронна среда, което следователно позволява оперирането (от страна на свързания човек; предвидено да се случва посредством *зрителната кора на централния мозък[0]*) на каквато и да е механика/техника/програма, управляема от дадената електронна среда. Това, въпреки че не променя острата реалност на изредените заболявания, би позволило на човек, засегнат от тях, да живее възможно най-нормален живот.

С развитието на тази технология, би могло да се стигне до пълно възстановяване на телесните функции, чрез инсталиране (в човешкото тяло) на механика, оперираща през НКИ с нейния ръководител (човека). Подобни уреди вече съществуват под формата на протетични крайници, екзоскелет и д.р.

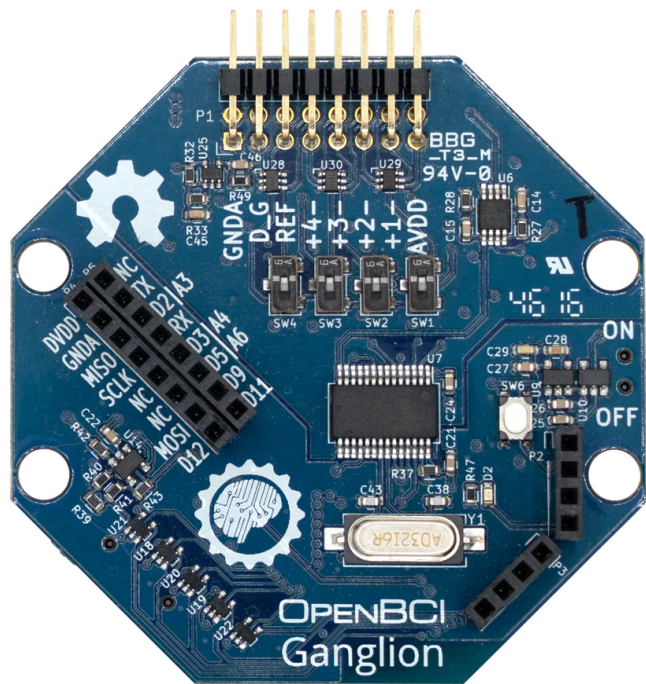
I. Съществуващи НКИ технологии и съпоставка с Cerebralink

1. OpenBCI

OpenBCI са множество хардуерни и софтуерни инструменти (с отворен код), които предоставят възможността за лесно интегриране на портативна НКИ технология в по-големи проекти/инфраструктури. Понеже OpenBCI проекта се състои от технология с отворен код, разчита също така и на принос от своята потребителска база. Предоставя голяма вариация от различни инструменти, които подпомагат изграждането на НКИ технология (биосензори, биоусилватели, ЕЕГ инструменти и т.н.).

1) OpenBCI Ganglion (4-канален)

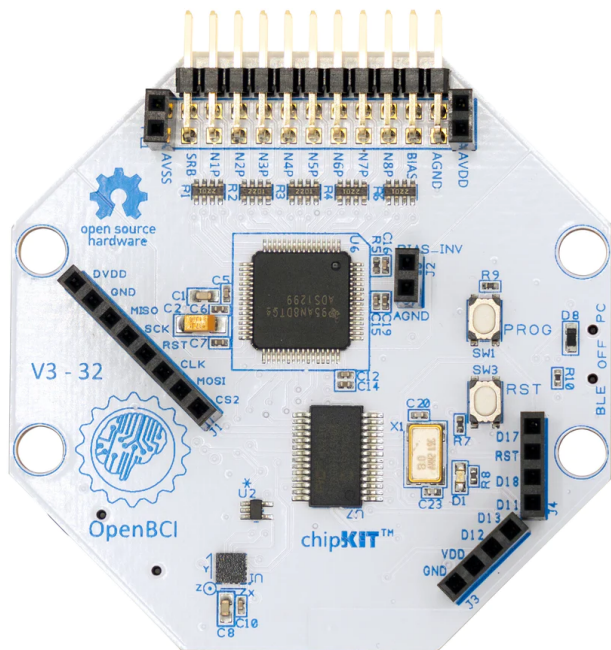
Това е 4-канален, съвместим с Ардуино, биосензорен модул, използван за отчитане на електрическата активност на централния мозък (работещ на същите принципи като медицинската практика електроенцефалография - ЕЕГ). Всяка разглеждана технология (вкл. Cerebralink) ще се основават на ЕЕГ принципите. Ganglion модула се характеризира с ниска консумация на ток (до 15 mA при четене и подаване на данни), висока честота на семплиране - 200 Hz (позволяващо на модула надеждно да отчита МЕА, до 100 Hz, вижте *честота на Найкуист*[1] за подробности), малки размери (6,1 x 6,1 см), позволяващи гореспоменатата портативност на модула, както и ниско работно напрежение (от 3.3 V до 6 V). Въпреки симплистично изглеждащата структура на Ganglion, най-комплексната (и скъпа) част всъщност са съставлящите го биоусилватели, които най-често се изработват с помощта на лазерна технология, за да се достигнат възможно най-високи нива на прецизност при тяхната дейност. Модулът е на сравнително ниска цена (499\$ [2]) за НКИ сферата, но дори и това е непосилно за повечето индивидуални (хоби) разработчици.



фиг. 1.1.1. Ganglion модул

2) OpenBCI Cyton (8-канален)

Модулът OpenBCI Cyton е 8-канален НКИ, съвместим с Arduino, с 32-битов процесор. В основата на модула е микроконтролерът PIC32MX250F128B (реф. [3]), който ѝ осигурява голяма локална памет и бърза обработка на данни. Данните се дискретизират със скорост 250 Hz за всеки от осемте канала. Принципът ѝ на отчитане на MEA е същият като при Ganglion (ЕЕГ). За разлика от Ganglion, Cyton разполага с двойно повече входни канали, което предоставя много по-висока резолюция на MEA. Cyton също така се характеризира с програмируем коефициент на усилване (на входните биоелектрически сигнали), по-голям обхват на нахранване (3.3 V до 12 V) и 24-битова поканална дискретизация на входните (усилени) сигнали (позволена от АЦП ADS1299 [4]). Този модул се състои от доста по-скъпи за производство компоненти от Ganglion, съответно и цената му е по-висока (999\$ [5]). Добър избор за фирмени проекти/продукти, но отново непосилен за повечето хоби разработчици.



фиг. 1.1.2. Cyton модул

2. NeuroSky

NeuroSky е производител на НКИ технологии за консуматорски потребности. Технологията на NeuroSky дава възможност за евтини изследвания и продукти, свързани с ЕЕГ, чрез използване на евтини сухи сензори. NeuroSky издава множество продукти директно за потребителите, като **MindWave**, като те обикновено са проектирани за максимална гъвкавост при използване или интеграция със страничен/външен софтуер/инфраструктура.

1) MindWave Mobile 2

Това е НКИ устройство, отчитащо МЕА сигнали в стандартния ЕЕГ обсег (1 - 100 Hz). За разлика от гореспоменатата OpenBCI технология, MindWave абстрахира работата с хардуера, директно предоставяйки **ППИ** за интеграция с външен софтуер (**ППИ** - **приложно-програмен интерфейс**; на англ. *API - Application Programming Interface*). Има налични, създадени от NeuroSky, приложения, които директно работят с MindWave устройството, чрез неговото ППИ. То представлява слушалко-подобен уред, поставящ се на главата. За разлика от всички разгледани устройства досега, MindWave е едноканално (съответно отчетената МЕА има много по-ниска резолюция). Честотата му на семплиране е 512 kHz, дискретизацията на (усиления) входен сигнал е 12-битова. Захранва се от една единствена AAA (1.5 V) батерия с живот до 8 часа. Способно е на Bluetooth предаване. Най-силната черта на MindWave, спрямо Ganglion и Cyton е приложно-програмният интерфейс, който изключително забързва и улеснява процеса на разработка на каквато и да е НКИ инфраструктура.



фиг. 1.2.1. MindWave Mobile 2

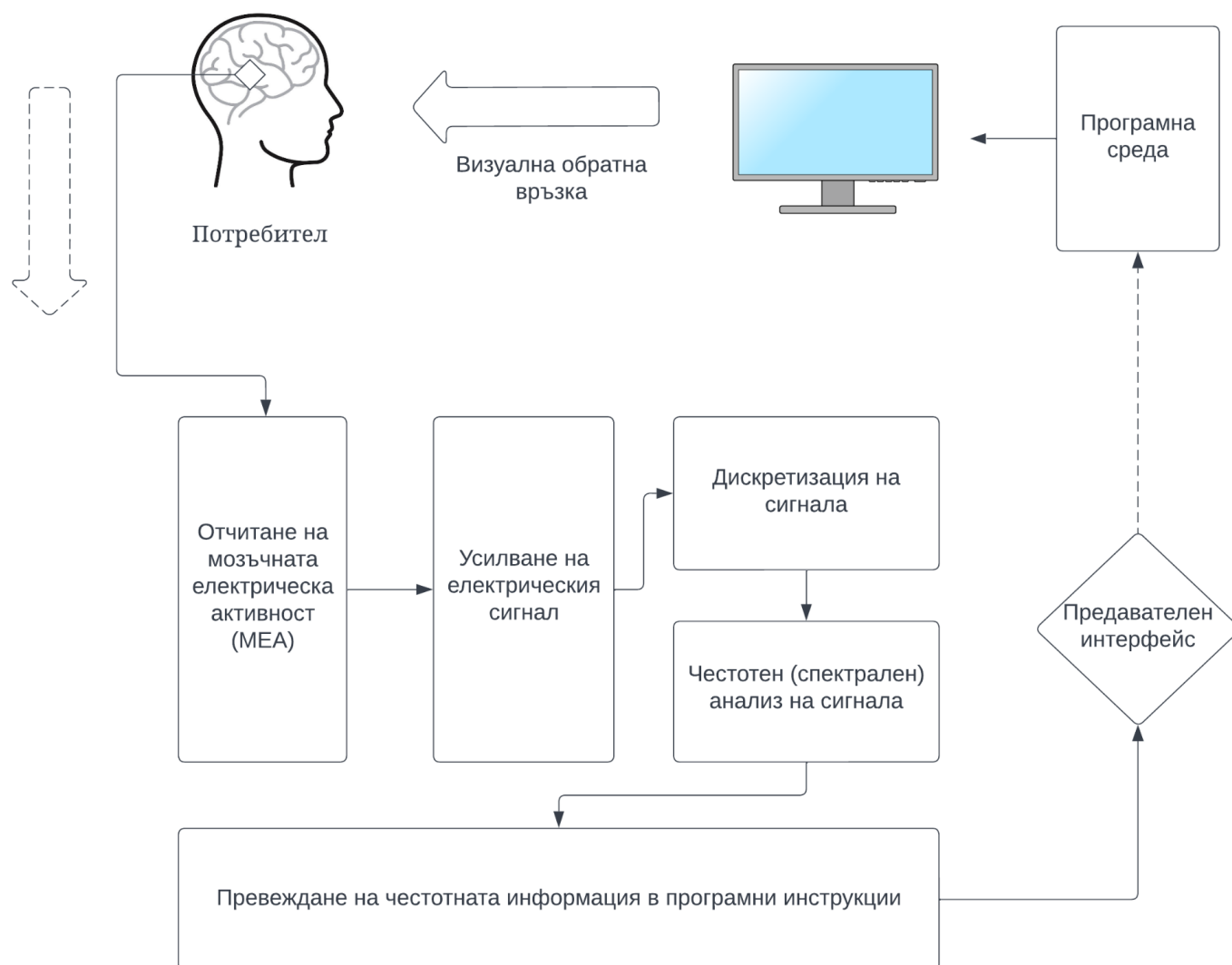
3. Съпоставка на Cerebralink с НКИ технологиите

Всеки от изброените НКИ има своите предимства и недостатъци. Докато OpenBCI Ganglion и Cyton предоставят висока резолюция на прочетената МЕА чрез тяхната многоканалност (и АЦП с голяма разделителна способност в случая на Cyton), те са напълно хардуерно-ориентирани, не са част от независимо устройство, което абстрахира тяхната функционалност - зависи от потребителя да ги направи част от такова (напр. платформа като Ардуино). Високата им прецизност води и до високи разходи при произвеждането им, което пък от своя страна ги прави скъпи продукти (официални цени, съответно: 499\$ и 999\$). В същото време, NeuroSky предлага цял НКИ комплект[6], в който влиза MindWave Mobile 2 (MWM 2), на цена 110\$, почти 5 пъти по-малко от OpenBCI Ganglion. За сметка на по-ниската цена, качеството на асимилация на МЕА на MWM 2 е сравнително по-малко от двата OpenBCI продукта, поради своята едноканалност и АЦП с по-ниска разрядност. MWM 2 е хардуерно абстрахирано устройство, означавайки, че човекът, който борави с него не е задължен да се занимава с вътрешния му начин на работа, а само да го интегрира в инфраструктурата си.

Целта на Cerebralink е да комбинира предимствата и на трите дадени примера за много по-ниска цена на продукцията. Cerebralink се характеризира с подобна на MWM 2 хардуерна абстракция, което го прави високо достъпен за консуматори, интересувачи се само от софтуерната част на НКИ технологията. Устройството е едноканално, което също намалява резолюцията на изходните данни, недостатък, който споделя с MWM 2. Въпреки това, устройството е предвидено да работи с лазерно изработени биоусилватели, което би позволило много по-прецизно асимилиране на МЕА, както при Ganglion и Cyton.

	Ganglion	Cyton	MWM 2	Cerebralink
Прецизност	висока	висока	средна	висока
Резолюция	висока	висока	ниска	ниска
Хардуерна абстракция	няма	няма	висока	висока
Безжичен обмен на данни	няма	има	има	има
Цена	висока	висока	ниска	ниска

II. Структура на Cerebralink. Начин на работа.



фиг. 2.1 Блок схема начина на работа на Cerebralink

1) Логически компоненти

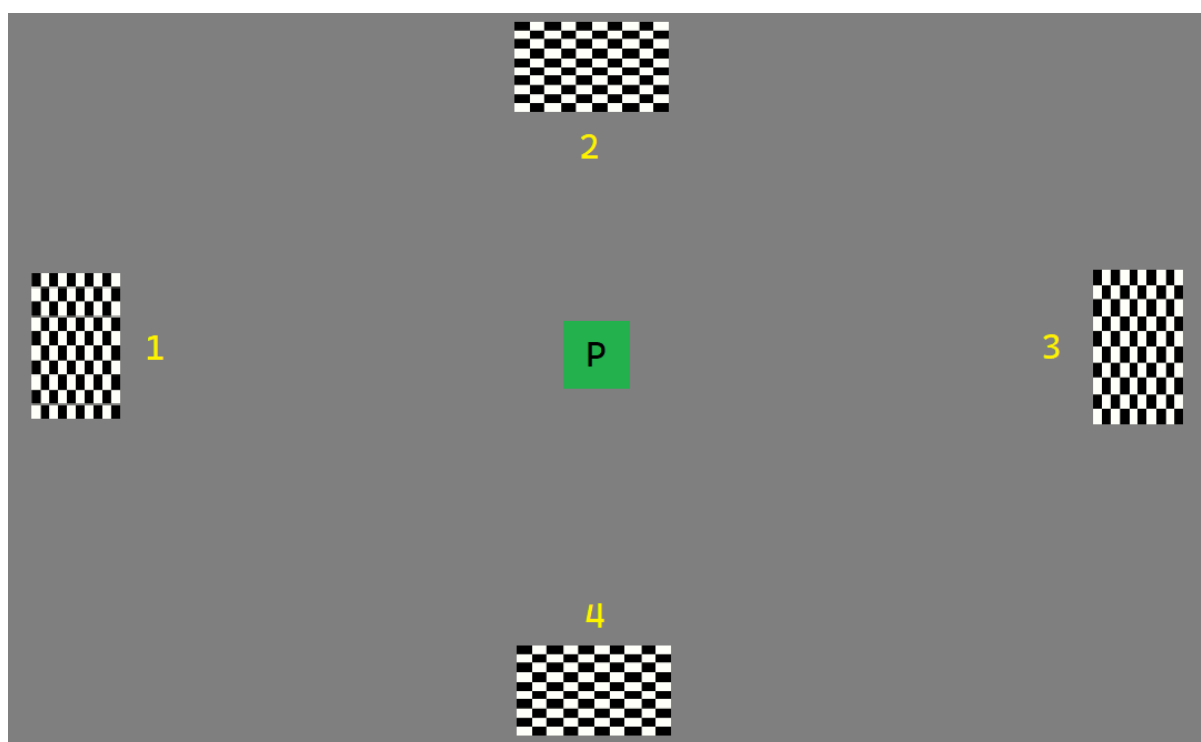
Cerebralink може да бъде обособен на няколко отделни логически компонента, като е напълно възможно застъпването на 2 или повече логически компонента във физическата реализация на проекта (това ще рече, че няколко физически компонента могат едновременно да отговарят за повече от 1 логически задачи):

- **Отчитане на МЕА** - Това е началната фаза на обработката на информация. Датчиците на Cerebralink съпровождат електрическите сигнали, достатъчно големи, за да бъдат прихванати от устройството, от скалпа на главата до усилвателната верига.

- **Усилване на електрическия сигнал** - Понеже електрическата активност на мозъка се характеризира с изключително ниска амплитуда на сигнала (от няколко mV на повърхността на мозъка до 10-100 μ V на повърхността на скалпа), тя подлежи на интерференция от ел. сигнали с по-голяма амплитуда, произлизащи от източници на електричество от околната среда (напр. градската ел. верига). За усилвателната верига, това се явява като *електрически шум* [7], който значително намалява качеството на така или иначе слабия полезен сигнал. Затова усилвателната фаза е **диференциална** - отчитат се потенциалите в 2 точки от скалпа на главата и се усилва тяхната разлика, така се премахва нежелания шум и се усилва само полезния (релативен, поради диференциалното усилване) сигнал.
- **Дискретизация на сигнала** - Усиленият аналогов сигнал се разделя на дискретни стойности (квантове), които могат да бъдат обработени от цифрово устройство като микроконтролера, който стои в основата на Cerebralink.
- **Спектрален анализ на сигнала** - Анализира се честотната лента на сигнала. Всеки електрически сигнал може да бъде представен като сбор от много ниско и високочестотни съставни сигнали (хармоници). Поради естествения начин на обработка на визуална информация от човешкия мозък, дадени високочестотни съставни на мозъчно-електрическия сигнал стават по-силни от други (с по-голяма амплитуда) при наличието на визуален стимул (мигаща светлина, картинка, т.н; вижте т. 2 - гл. II).
- **Превеждане на честотната информация** - След изолирането на съставните с висока амплитуда, се взема предвид тяхното зададено значение, дадени честоти от честотната лента на анализирания сигнал отговарят на различни инструкции, които могат да бъдат подадени на крайното (компютърно) устройство. На този етап, това тяхно значение се схваща като съответстващата им програмна инструкция и се приготвя за трансфер от Cerebralink устройството до устройството приемник.
- **Предавателен интерфейс** - Когато изолираната съставна бъде напасната със съответстващата ѝ инструкция, тя бива изпратена на устройството, към което е свързан Cerebralink. Връзката се осъществява посредством Bluetooth. От страна на устройството приемник, инструкциите се изпълняват от приложна програма, работеща на същото устройство.

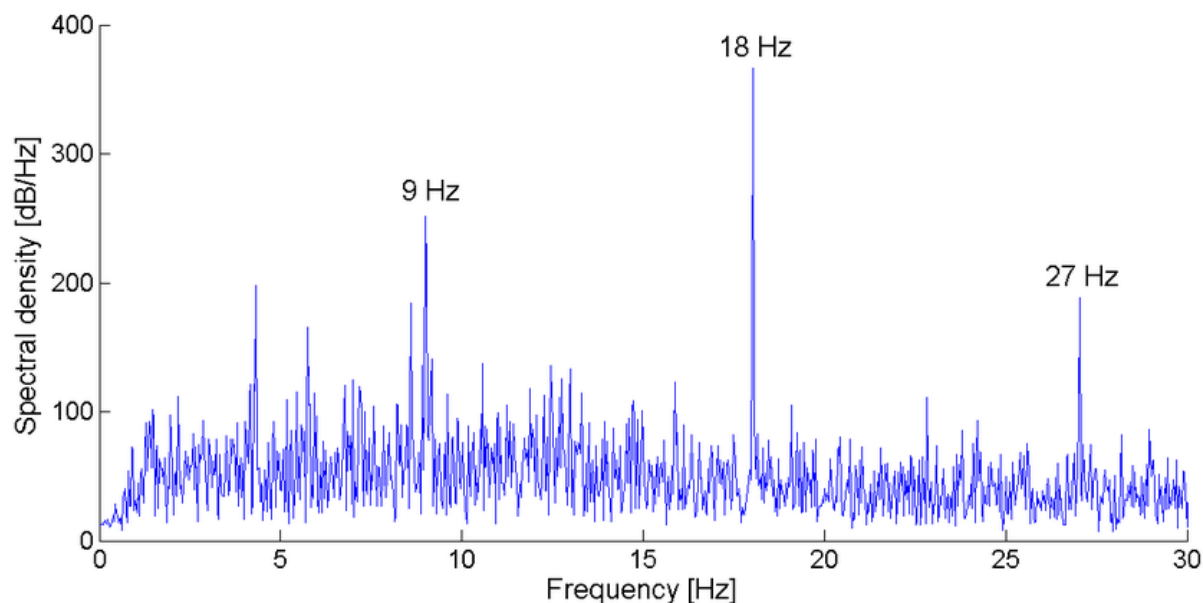
2) Cerebralink приложни програми и SSVEP

Това са всички desktop/мобилни програми, които свързват устройството приемник и Cerebralink устройството. Не е предвидено да има утвърден стандарт за такива приложни програми - тяхната имплементация зависи изцяло от лицето, което интегрира Cerebralink в своята инфраструктура, неговите цели за интеграцията, както и идеята на разработвания от него проект. Основното правило, което приложни програми трябва да следват, стига да целят пълноценна интеграция с Cerebralink, е оползотворяването на инструменти за *пораждане на електрически потенциал в човешкия мозък чрез визуален стимул (SSVEP* - от англ. *Steady State Visually Evoked Potential* [8]). Това най-често се постига чрез показване на картинка/фигура, мигаща с дадена честота.



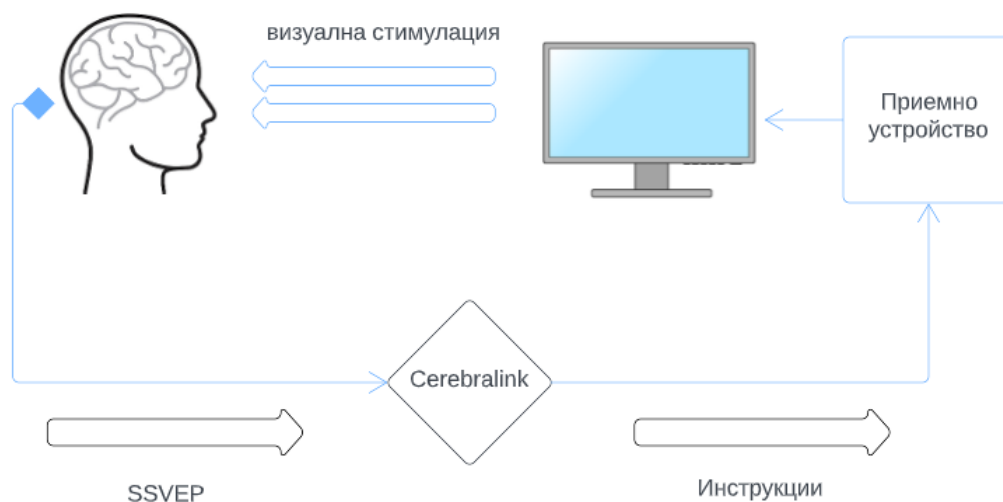
фиг. 2.2.1 - Примерена програма, кутиите, номерирани от 1 до 4, са пулсиращите с дадена (различна) честота елементи. Зеленият квадрат, означен с 'P' е играчът.

Централният мозък има свойството да се синхронизира с пулсиращи визуални сигнали. Когато човек гледа светлина/картина, която изчезва и се появява 20 пъти в секундата (честота: 20 Hz), електрическа активност, доловена от зрителната кора на централния мозък има високоамплитудни съставни елементи, с честоти, кратни на 20 Hz.



фиг. 2.2.2 - Спектрална плътност (разпределянето на мощност измежду различните честоти) на ЕЕГ сигнал при SSVEP стимулация с 9-херцов стимулант. Наблюдава се високо разпределение на мощност и при 2 хармоника на 9 Hz. [9]

Ако кутиите, номерирани от 1 до 4 на фиг. 2.2.1, пулсират съответно с 4 различни честоти, се очаква да се наблюдава сравнително голямо разпределение на мощност при честоти, близки до тези на пулсиращите кутии, в спектралния анализ на ЕЕГ сигнала, който Cerebralink отчита от потребителя си, когато той фокусира вниманието си на (поне) една от тях. Съответно, съсредоточаването на внимание върху една от кутиите може да бъде напаснато с команда за движение на играча (маркиран с 'Р' на фиг. 2.2.1; напр. кутията до горната граница на игралното поле отговаря за инструкция "върви нагоре") и това да бъде отразено от приложната програма, когато получи тази информация от Cerebralink устройството (съответно, да премести играча в желаната посока). То може да отчита електрически сигнал, произлизащ от какъвто и да е визуален (пулсиращ) стимул, не е задължително той да бъде предоставен от приложната програма. Единствено Cerebralink устройството трябва да бъде калибрирано с работната честота на пулсиращия стимул.



фиг. 2.2.3 - Поток на информацията в една стандартна затворена верига на Cerebralink инфраструктура.

III. Физически компоненти и ел. схема

1) Компонентен състав на проекта

Cerebralink се състои от няколко макроелемента, които отговарят за главния принцип на работа на устройството, както и от множество други елементи, които служат за филтриране на сигнала, определяне на коефициент на усилване и т.н.

- **Arduino UNO**

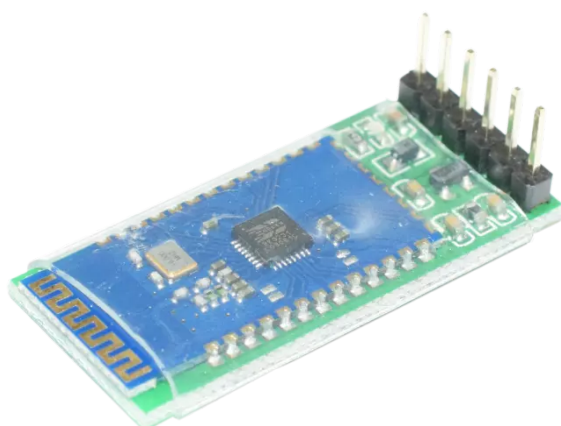
Това е микроконтролерна платка, базирана на микроконтролера **Atmega328P** [10]. Работната му честота е 16 MHz. Разполага с 14 входно-изходни щифта (6 от които могат да бъдат използвани за ШИМ сигнали), както и 6 аналогови входни щифта (през които усилвателната схема на Cerebralink ще комуникира с микроконтролера). Може да се захранва през буската за захранване (7-12 V), щифта за захранване (V_{in} ; 7-12 V), както и през USB порта (5 V). Има наличност на 32 KB флаш памет и 1 KB **EEPROM** [11].



фиг. 3.1.1 - Arduino UNO с микроконтролера Atmega328P в средата

- **Bluetooth модул HC-06**

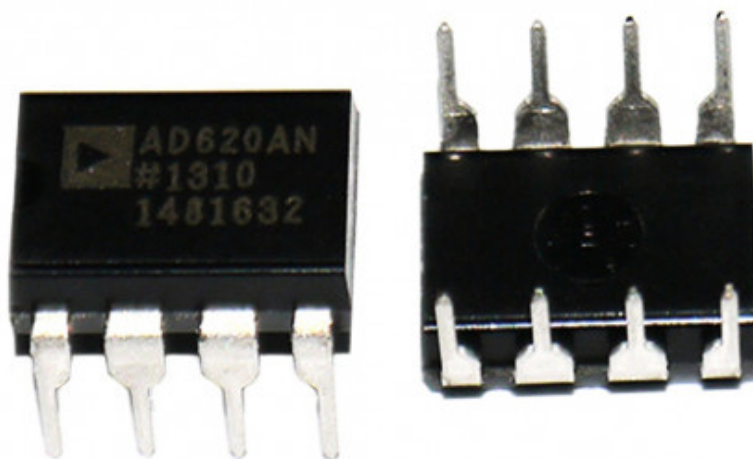
На този модул се основава комуникацията между Cerebralink и устройството приемник. Той е трансмитер/предавател и приемник (на англ. *transceiver*), използва се за изпращане на инструкции на приложното приложение, интегрирано с Cerebralink, след обработването на отчетената от скалпа на потребителя МЕА. Единственият комуникационен протокол, който HC-06 поддържа е UART - асинхронна двупосочна комуникация между него и микроконтролера. Работната му честота (на излъчване) е 2,4 GHz. Захранва се на 5 V. Максималния обхват на действие е до 50 метра. Скоростта (по подразбиране) на обмена на данни е 9600 бита в секунда.



фиг. 3.1.2 - HC-06
Bluetooth модул

- **Инструментален усилвател AD620**

AD620 е евтин и високоточен инструментален усилвател, който се нуждае само от един външен резистор, за да се зададе коефициент на усилване от 1 до 10 000. Поради големия му коефициент на потискане на *синфазни сигнали* и ниското входно напрежение на несиметрия, той е подходящ за медицински електронни уреди за инструментация (ЕЕГ, ЕКГ и т.н.). Синфазните сигнали са вид шум, който се появява и на двата входа на усилвателя, като са във фаза един с друг (еднаква полярност). Идеалният диференциален усилвател (ДУ) потиска синфазните сигнали (СС) напълно, но всеки реален ДУ има характерни за себе си физически особености, които не му позволяват да потиска СС изцяло. AD620 е създаден с помощта на лазерна технология, като този процес прави усилвателя силно прецизен, позволявайки му да потиска СС много по-точно. Използва се в началото на усилвателната фаза, за усилването на слабите електрически сигнали от скалпа.

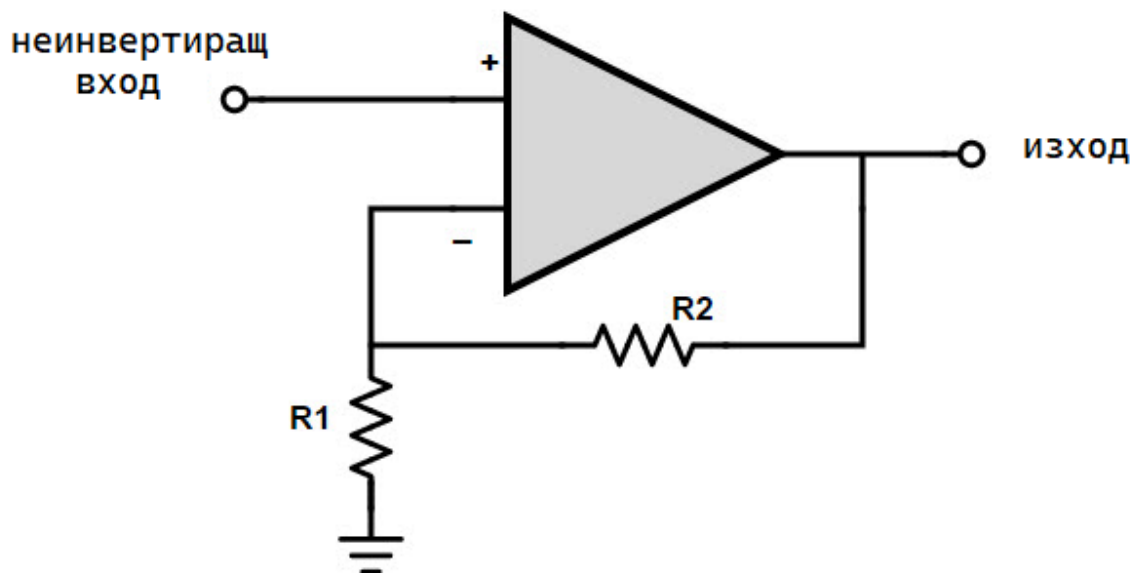


фиг. 3.1.3 - Инс. усилвател AD620, Through hole

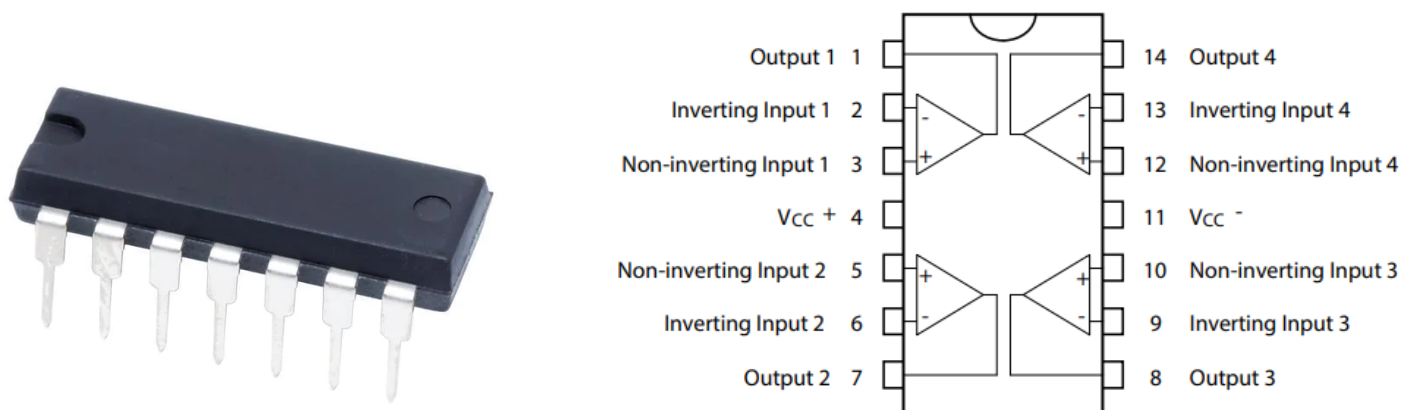
- **Операционен усилвател (ОУ) TL074CN**

Това е четворен операционен усилвател (в един чип има 4 ОУ), който се използва за допълнително усилване на диференциалния сигнал на изхода на AD620, както и за допълнително премахване на синфазни сигнали след усилвателната стъпка на AD620. Синфазният сигнал се взема от AD620, усилва се и се инвертира чрез TL074CN и се връща към потребителя. Така, когато синфазният сигнал повдига потенциала на входовете на AD620, усилвателната инвертираща схема, в чиято основа стои TL074CN, нулира влиянието на синфазния сигнал върху инструменталния усилвател.

- Операционните усилватели са вид диференциални усилватели с **много голям коефициент на усилване** (в идеалния случай - безкрайно голям, на практика - до 10^6). Техният коефициент на усилване може да се регулира с помощта на положителна или отрицателна обратна връзка (ПОВ / ООВ), посредством делител на напрежение.



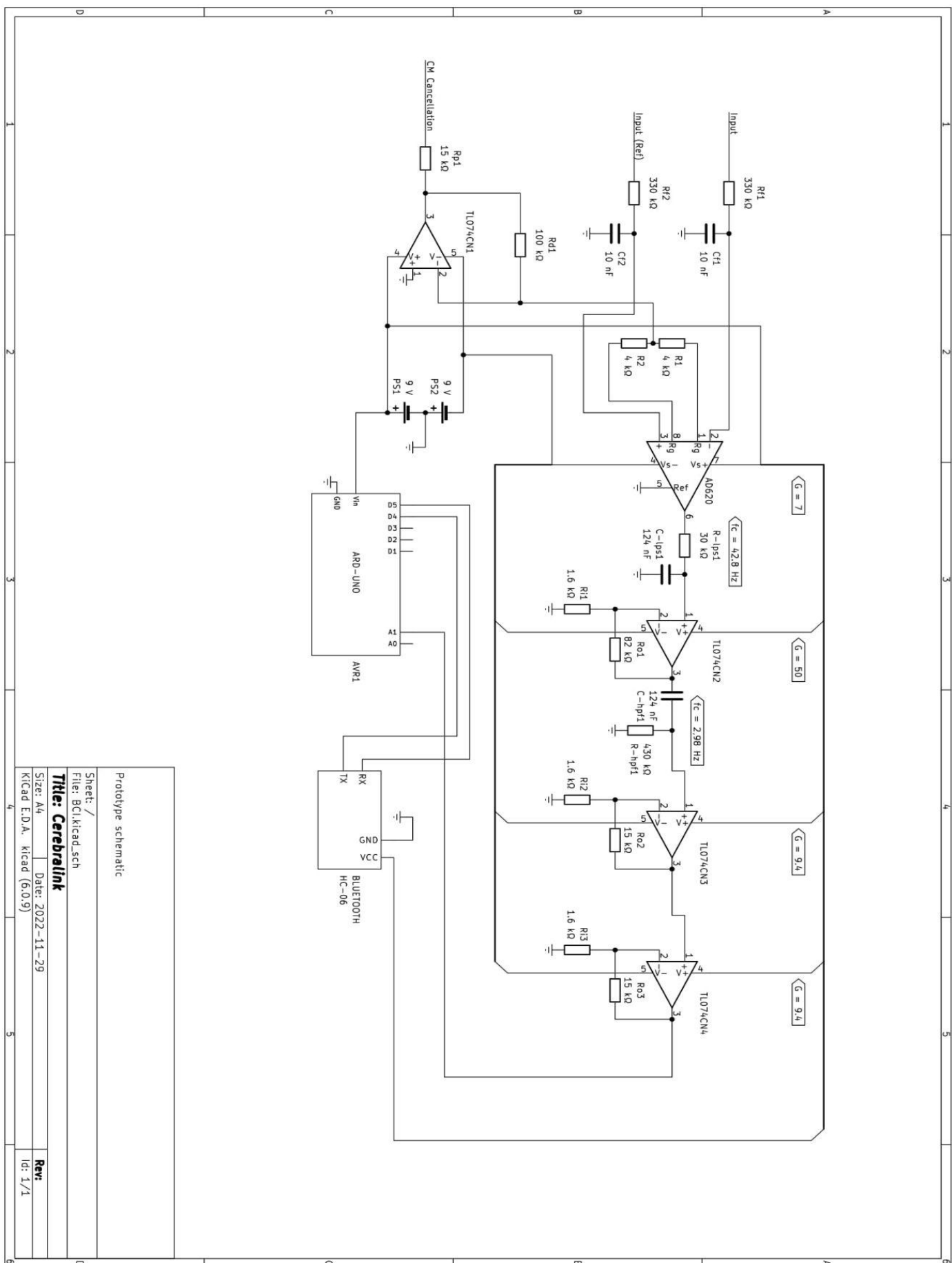
фиг. 3.1.4 - Неинвертираща схема на ОУ с ООВ, коефициентът на усилване се определя от делителя на напрежение R1 - R2



фиг. 3.1.5-6 Физически компонент TL074CN и логическа схема на вътрешността му

Други използвани компоненти са резистори и кондензатори с различни номинални стойности, подходящо подбрани за изработването на високо и нискофреотни филтри, които служат за потискането на шум от околната среда, както и за филтрирането на съставни сигнали, лежащи в безполезен за целта на устройството честотен диапазон.

2) Принципна електронна схема на Cerebralink



Референции и използвана литература

1. TL074CN Datasheet - https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl074.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1674421969013&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.co.uk%252F
 2. AD620 Datasheet - <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf>
 3. OpenBCI Ganglion - <https://shop.openbci.com/products/ganglion-board>
 4. OpenBCI Cyton - <https://shop.openbci.com/products/cyton-biosensing-board-8-channel>
 5. MindWave Mobile 2 - <https://store.neurosky.com/pages/mindwave>
 6. HC-06 Datasheet - <https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>
-

Референции

- [0] - <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482504/>
- [1] - <https://www.techtarget.com/whatis/definition/Nyquist-Theorem>
- [2] - Вижте линк №3 от горната секция
- [3] - <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC32MX250F128B#document-table>
- [4] - <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1299.pdf>
- [5] - Вижте линк №4 от горната секция
- [6] - Вижте линк №5 от горната секция
- [7] - <https://www.electricalvolt.com/2022/03/noise-in-electronic-systems-and-types-of-noise/>
- [8] - <https://mentalab.com/ssvep-basics/>
- [9] - https://www.researchgate.net/publication/260395210_Neural_Responses_to_Target_Features_outside_a_Search_Array_Are_Enhanced_during_Conjunction_but_Not_Unique-Feature_Search
- [10] - <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P#document-table>
- [11] - <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/eeprom>

Съдържание

Увод	2
I. Съществуващи НКИ технологии и съпоставка с Cerebralink	3
1. OpenBCI	3
1) OpenBCI Ganglion (4-канален)	3
2) OpenBCI Cyton (8-канален)	4
2. NeuroSky	5
1) MindWave Mobile 2	6
3. Съпоставка на Cerebralink с НКИ технологиите	7
II. Структура на Cerebralink. Начин на работа.	8
1. Логически компоненти	8
2. Cerebralink приложни програми и SSVEP	10
III. Физически компоненти и ел. схема	12
1. Компонентен състав на проекта	12
1) Arduino UNO	12
2) Bluetooth модул HC-06	13
3) Инструментален усилвател AD620	14
4) Операционен усилвател (ОУ) TL074CN	15
2. Принципна електронна схема на Cerebralink	17
Референции и използвана литература	18
Съдържание	19