

GSM 1800-ში გამოყენებული ელექტრომაგნიტური ველების ცალკეულ ნეირონზე ზეგავლენის გამოკვლევა

არა იონიზებადი ელექტრომაგნიტური ველების (ემვ) დიაპაზონი მოიცავს სიხშირეებს 0 ჰერციდან 300 გეგაჰერცამდე. ცოცხალი ორგანიზმები და მათ შორის ადამიანიც ძლიერად ექვემდებარება ასეთი სახის ემვ-ბის ზემოქმედებას, თუმცა, სამწუხაროდ, ადამიანს არ გააჩნია რეცეპტორები ამ დიაპაზონის ემვ-ბის აღსაქმელად, რაც განსაკუთრებით საშიშს ხდის მათ ზემოქმედებას. სხვადასხვა სიხშირის ემვ-ბის ორგანიზმზე ზემოქმედებას სხვადასხვა მექანიზმი გააჩნია. უაღრესად დაბალი და დაბალი სიხშირის ემვ-ბის მიმართ ექსპოზიციისას ცოცხალ ქსოვილში აღიქმება იონური დენები. თუ ემვ სიხშირე რადოსიხშირის დიაპაზონისაა ზემოქმედება გამოიხატება ბიოლოგიური ქსოვილის მიერ ემვ-ს ენერგიის შთანთქმით, რაც მის გახურებას იწვევს, ეს ბიოლოგიური ქსოვილის ეპმერატურის აწევით გამოიხატება, და აშკარაა რომ მავნეა ჯანმრთელობისათვის - ე.წ. სითბური ზემოქმედება. თუმცა უკანასკნელ წლებში დადგინდა, რომ რადოსიხშირის ემვ-ს გართა სითბური ზემოქმედებისა ასევე გააჩნით არასითბური ეფექტებიც. მაგალითად რადოსიხშირის ემვ-ბი იწვევენ ადამიანის აღზნებადობის გაზრდას, თავის ტკივილებს, მეხსიერების დაქვეითებას და სხვა. ამ სიხშირეების ემვ-ბის უარყოფით ზემოქმედებათაგან უნდა აღინიშნოს აგრეთვე კიბოს გაჩენის რისკების არსებობა.

სიხშირეზე დამოკიდებული აგრეთვე ემვ-ს ქსოვილში შეღწევის უნარი. ასე მაგალითად, რადოსიხშირის ემვ მთლიანად განჭოლავს ცოცხალ ქსოვილებს, მაშინ როცა 300 გეგაჰერცი სიხშირის დიაპაზონის ემვ მხოლოდ რამოდენიმე მილიმეტრით შედის ბიოლოგიურ ქსოვილში.

არაიონიზებადი რადიაციის ზემოქმედება ადამიანზე დიდ ხანია მეცნიერთა ყურადღების ცენტრშია. შექმნილია რამოდენიმე საერთაშორისო ორგანიზაცია, მათ შორის აღიარებულია ელქტრული და ელექტრონული საინჟინრო ინსტიტუტი (აშშ) ე.წ IEEE, არაიონიზებადი რადიაციისაგან დაცვის საერთაშორისო კომისია (ICNIRP) და სხვა. ამ უკანასკნელის მიერ შექმნილია სახელმძღვანელოები (რეკომენდაციები) ემვ უსაფრთხოების დონეების შესახებ, რომლებიც აღიარებულია როგორც სახელმძღვანელო მრავალი ქვეყნის მთავრობების მიერ. ცხადია ეს რეკომენდაციები მოიცავენ ასევე ემვ იმ სიხშირეებსაც რომლებიც გამოყენებულია მობილურ კავშირგაბმულობაში. უნდა აღინიშნოს, რომ ICNIRP –ის რეკომენდაციები ეფუძნება გასაშუალოების პრინციპს. გასაშუალოება ხდება როგორც სივრცითი ასევე დროის მიხედვით. გასაშუალოების დროდ აღებულია მხოლოდ 6 წუთი, მაშინ როცა მობილური ტელეფონის გამოყენება გაცილებით ხანგრძლივია დღევანდელ პირობებში. რაც შეეხება სივრცით გასაშუალოებას- როდესაც საქმე ეხება მობილური ტელეფონის გამოსხივების გავლენას თავის ტვინზე- ხდება ტვინის ქსოვილების მიერ შთანთქმული ენერგიის გასაშუალოება და მიღებული შედეგი აიღება როგორც დაკვირვების დონე. მეორეს მხრივ აშკარაა რომ ტვინის განსაზღვრული არეები შთანთქავენ იმზე მეტ ემვ ენერგიებს, ვიდრე ეს დაშვებულია ნორმებით. უცნობია თუ როგორ ფუნქციონირებენ ნეირონები ამ პიკური შთანთქმის არეებში. აქვს თუ არა ადგილი აკუმულაციის ეფექტებს განმეორებადი დასხივებების პირობებში. აღსანიშნავია ის გარემოებაც, რომ ძალიან სწრაფად ხდება მობილური აპარატების მოდერნიზირება, მაგალითად გადამტანი სიხშირეები თავდაპირველად იყო 800 მეგაჰერცი, ამჟამად 1800 მეგაჰერცია, ხოლო ახლო მომავალში 2,4 გეგაჰერცი იქნება.

მრავალ პასუხგაუცემელ კითხვებს შორის მნიშვნელოვანი იყო შემდეგი კითხვები: რა ზემოქმედება გააჩნია თანამედროვე მობილურ კავშირგაბმულობაში გამოყენებულ რადიოსიხშირის ელექტრომაგნიტურ ველებს ცალკეულ ნეირონზე? გააჩნია თუ არა ნეირონზე ზემოქმედება იმ დაბალ სიხშირეებს რომლებიც მობილური კავშირგაბმულობის მოდულაციაში გამოიყენება? აქვს თუ არა გავლენა ნეირონზე მოდულაციაში გამოყენებულთან მახლობელ სხვა დაბალ სიხშირეების ემ ველებს? რა ეფექტი ექნება განმეორებით დასხივებებს ანუ აქვს თუ არა ადგილი ემ ზემოქმედებათა დარგოვებას? აქვს თუ არა ადგილი არათერმულ ეფექტებს?

ამ კითხვების დასმა ბუნებრივად აღიძრა, რადგან ნეირონი წარმოადგენს ტვინის ძირითად ელემენტს და მასზე ემ-ს ზემოქმედების ცოდნის გარეშე რთულია გაერკვე მთელ ტვინზე ემ-ს ზემოქმედებათა მექანიზმები.

გამომდინარე თქმულიადაც მოცემული პროექტის მიზანი იყო შეგვესწავლა მობილური კავშირგაბმულობაში გამოყენებული ელექტრომაგნიტური ველების ზეგავლენა ცალკეულ ნეირონზე. დასხულ იქნა ამოცანები, რომლებიც მოიცავდნენ:

- ექსპექსპერიმენტი ბაზის მომზადებას:
ე.წ. განივი ელექტრომაგნიტური უჯრედის დამუშავება 1800 მგჰც-სათვის (ინგლისური აბრევიატურა Transverse electromagnetic cell TEM Cell). შემდეგში გამოვიყენებთ ამ ტერმინს - TEM Cell. TEM Cell-ის შექმნა და პარამეტრების დადგენა; დაბალი სიხშირეებით მოდულირებული 1800 მგჰც გენერატორის დამუშავება და შექმნა; ჰელმჰოლცის კოჭების დამუშავება და შექმნა;
- 1800 მგჰც სიხშირის უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ტალღის ნეირონის უჯრედშიგა და სინაფსურ სტიმულაციაზე მიხვევის პროცესზე გავლენის გამოკვლევა;
- 1-20 ჰერცი (განცალკევებულად) სიხშირით მოდულირებული 1800 მგჰც გენერატორის გამოსხივებული ემ-ის ნეირონის უჯრედშიგა და სინაფსურ სტიმულაციის მიმართ მიხვევის პროცესზე გავლენის გამოკვლევა
- 1-20 ჰერცი დაბალი სიხშირის ემ-ის ნეირონის უჯრედშიგა და სინაფსურ სტიმულაციაზე მიხვევის პროცესზე გავლენის
- ხანგრძლივი განმეორებითი ექსპოზიციის ნეირონზე ზემოქმედების კვლევა აკუმულირების ეფექტების გამოვლენის მიზნით

იმისათვის რომ შესწავლილ იქნას ემ-ს გავლენა ბიოლოგიურ ქსოვილზე და კერძოდ ნეირონებზე საჭიროა, რათა დადგენილ იქნა ემ-ს ის რაოდენობა რომელისაც შთანთქმავს ბიოლოგიური ქსოვილი. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად დამუშავებულ იქნა TEM CELL-ი. თავდაპირველად მოხდა TEM Cell -ის კომპიუტერული მოდელირება და მასში ემ-ს გავრცელების აღწერა.

განივი ელექტრომაგნიტური უჯრედის (TEM Cell-ის) მოდელირება და პატრამეტრების დადგენა

განივი ელექტრომაგნიტური უჯრედი -TEM Cell წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური ტალღების გამტარს, რომელშიც საკვლევი ბიოლოგიური ობიექტის მოთავსების შემთხვევაში მოხდება ამ ობიექტის დასხივება გამავალი ელექტრომაგნიტური ტალღებით. დოზიმეტრიის ამოცანებიდან გამომდინარე, ასეთ ექსპერიმენტში აუცილებელია, რომ იმ არეში სადაც მოთავსებული იქნება ბიოლოგიური ობიექტი, ელექტრომაგნიტური ველი იყოს ერთგვაროვანი. ეს იმას ნიშნავს, რომ ველი უნდა იყოს ანალოგიური ე.წ. შორი ველისა, სადაც ტალღის ფრონტი არის ბრტყელი. ასეთი ამოცანის გადასაჭრელად საჭროა დადგენილ იქნას TEM Cell-ის როგორც ოპტიმალური ფორმა ასევე ზომები.

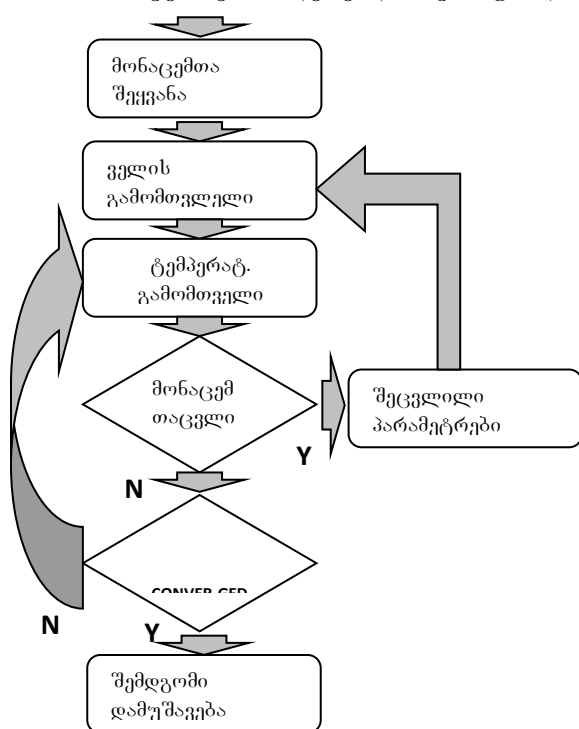
იმის გამო, რომ TEM Cell-მა უნდა გაიმეოროს ტალღის გამტარი კაბელის ფუნქცია, გადავწყვიტეთ შეგვექმნა TEM Cell რომელსაც ექნებოდა მართკუთხა გამტარის ფორმა. ამასთანავე გადავწყვიტეთ რომ ბოლოები წაწვეტებული ყოფილიყო. წაწვეტებული ბოლოები საშუალებას იძლევა არეკვლებისა და დანაკარგების გარეშე მოხდეს ელექტრომაგნიტური ტალღის გატარება ტალღგამტარში. წინააღმდეგ შემთხვევაში ველი TEM Cell –ში საერთოდ არ იქნებოდა ერთგვაროვანი, ე.ი შეუძლებელი იქნებოდა დოზიმეტრირება. ამას გარდა TEM Cell -ის შუა ნაწილი ე.წ. septum წამოადგენს განსაზღვრული ფორმის გამტარს, რომლის ბილოები მირჩილულია შესავალ და გამოსავალ ბუდეებთან და იზოლირებული არიან TEM Cell –ის კორპუსისაგან.

პროგრამული პაკეტის დამუშავება

TEM Cell –ის მოდელირებისა და ცოცხალ ობიექტზე ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების მოდელირებისათვის გამოყენებულ იქნა სასრულო სხვაობების მქონე დროითი დომენების Finite-Difference Time-Domain (FDTD) მეთოდი, ასევე თერმული ანალიზის მეთოდი. დამუშავებულ პროგრამაში გეომეტრიისა და ზომების პრობლემა წყდება საყოველთაოდ აღიარებულ ფორმულების, როგორიცაა STL, NASTRAN გამოყენებით, ან ხდება ხელით გენერირება. ამასთანავე შესაძლებელია ვიზუალიზირდეს წარმოებული ბადის გეომეტრია და

მოხდეს მისი რედაქტირება. ამის გამო საშუალება გვეძლევა კონსტრუირებულ იქნას რთული ფორმის სხეულები. შესაძლებელია ბრუნვა ზომების შეცვლა დეფორმირება როგორც ნაწილობრივ ასევე სრულად. სხეულზე ზემოქმედებები ხდება მაუსის გამოყენებით და კეიბორდის გამოყენებით ან ბრძანებათა გამოყენებით console or script არეში.

ელექტრომაგნიტური ველის ცენტრალური გამომთვლელი პროგრამა არის ძირითადი ინსტრუმენტი ელექტრომაგნიტური ველის ანალიზისათვის, რომელიც დაფუძნებულია Yee ალგორითმზე.



დამუშავებული ველის გამომთვლელი საშუალებას იძლევა ადებულ იქნას ყველა შესაძლო გამოსხივების წყარო, ნებისმიერი გეომეტრიის მქონე სტრუქტურა და ამასთანავე განისაზღვროს ნივთიერების თვისებები. ამ გზით წამოადგენილ იქნას სიხშირეები და ტემპერატურული ეფექტები. შეიძლება გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა სასაზღვრო პირობა, რაც უპირატესობას ანიჭებს ადებულ ქსელს. ამრიგად, შესაძლებელია შესრულდეს ყველ ველის გამოთვლა. ამასთანავე შესაძლებელია MAS –ის გამოყენება სათანადო გეომეტრიისათვის (ნაწილობრივი გეომეტრიული პრობლემები), როგორც უფრო ეფექტურისა (ე.ი ნაკლები რესურსების მომთხოვნისა და უფრო სწრაფისა). როგორც კი მოხდება ველის ამოხსნა ყველა წერტილის მიმართ, ხდება ინტეგრალური სიდიდეების გამოთვლა. კერძოდ გამოითვლება შთანთქმის კუთრი თანრიგის (SAR) გამოთვლა. ველის გამომთვლელის გამოსავალი, რომელიც SAR-ის მნიშვნელობებს შეიცავს წარმოადგენს ტემპერატურის გამომთვლელის შესავალს. იმიტაციის მოძრაობა ნაჩვენებია სურათ 1-ზე.

ტემპერატურის ზრდის გამოთვლა ეფუძნება Bioheat –ის განტოლებას (Pennes მოდელი -რომელსაც აქვს ცვლადი სასაზღვრო პირობები. თავდაპირველად ხდება ტემპერატურის საწყისი განაწილების განსაზღვრა. შემდგომ, წონასწორობიდან გამომდინარე ტემპერატურულ გამაწილებაზე დაყრდნობით, ხდება მიღებული SAR –ით ტემპერატურის ნაზრდის გამოთვლა. თუ ტემპერატურის გამოთვლისას აღმოჩნდება, რომ ნივთიერების დიფუზიური მახასიათებლები მნიშვნელოვნად იცვლება, ხდება პარამეტრების განახლება. ველი გამოითვლება ახალი პარამეტრებით, ვიდრე არ მოხდება ტემპერატურის მდგრადობა.

TEM Cell -ს მოდელირება

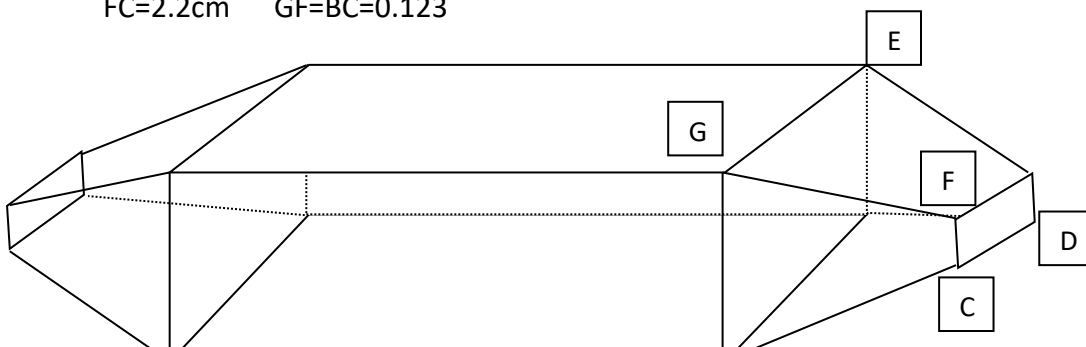
დიდი ზომის ოთხკუთხეა გამტარები ფართოდ გამოიყენება განივი ელექტრომაგნიტური ველებისათვის. ისინი ხასიათდებიან ჰაერის დიფუზიური და თხელი ცენტრალური გამტარით (septum), რომელიც გარშემორტყმულია ოთხკუთხეა გამტარით. მთავარი მიზანია არსებობდეს ერთგვაროვანი განივი ელექტრომაგნიტური ველი. პირველად ასეთი გამტარები აღწერილ იქნა კლაუდეს Claudie მიერ. ჩვენს მიერ დამუშავებული TEM cell –ის ზომები მოცემულია სურ. 2 ზე.

TEM Cell

$$|GE|=8.2\text{cm} \quad GB=8.3\text{cm}$$

$$CD=3.6\text{cm} \quad AB=30.6\text{cm}$$

$$FC=2.2\text{cm} \quad GF=BC=0.123$$





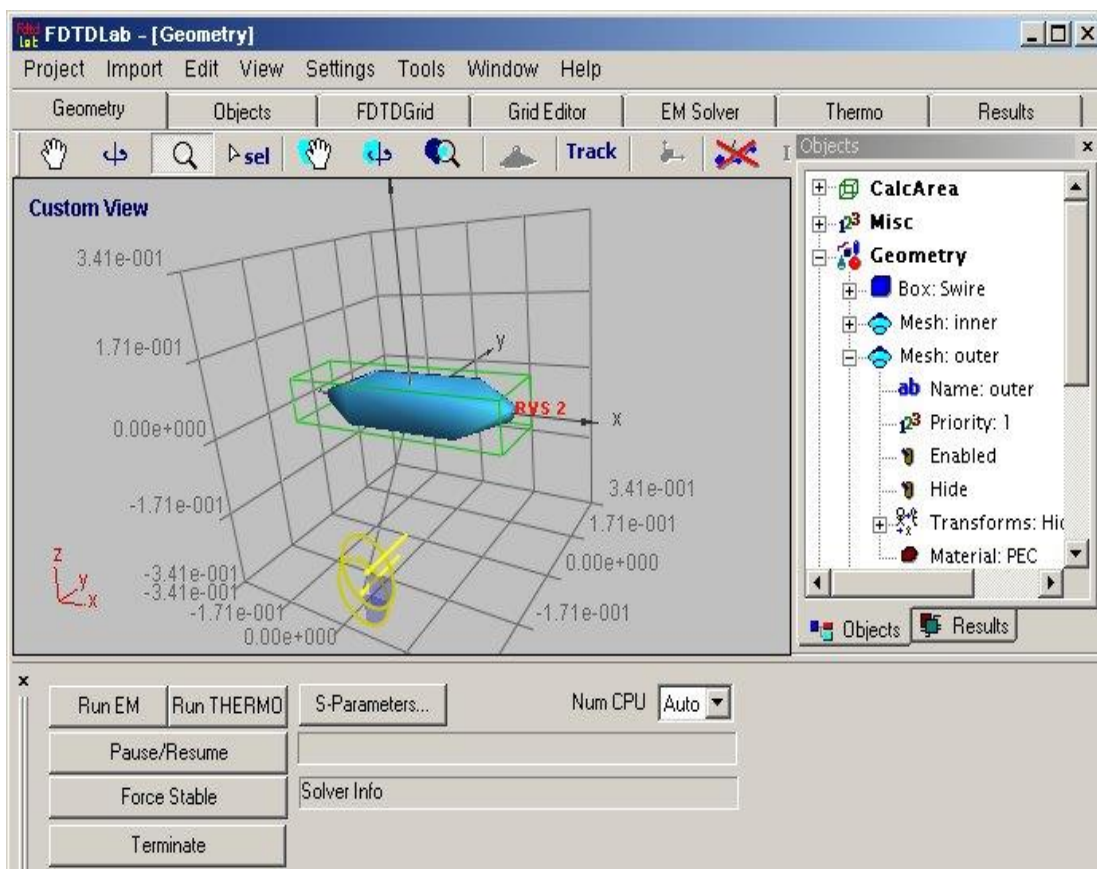
$eb=7.9\text{cm}$ $bc=0.115$

$ab=27.6$

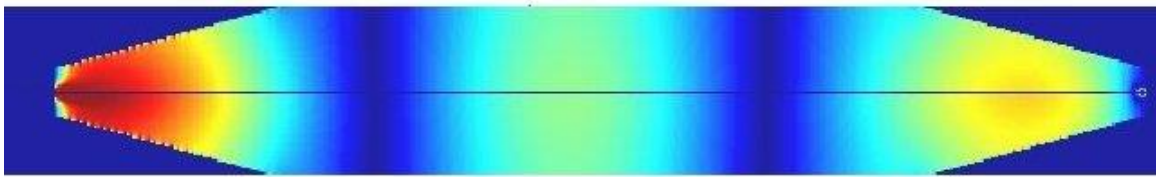
$cd=2.8\text{sm}$

სურ. 2

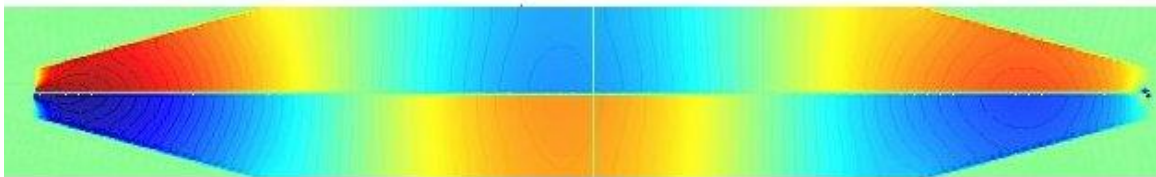
septum -ის სისქე $t=1\text{mm}$. septum -ის სიგანის ცვალებადობით მიღწეულ იქნა 1800 მგპც-სათვის septum -ის ოპტიმალური ზომა. მოდელში შესავალზე მოდებულ იქნა 1 ვოლტი ძაბვა, 50 ომ წინააღობაზე. TEM cell მეორე მხარე ბოლოვდება ასევე 50 ომიანი წინააღმდეგობით, რათა მოხდეს წინააღობათა შეთანხმება. სურ. 3-ზე ნაჩვენებია მოდელირებული TEM cell.



ველის Ez სიმულირებული კომპონენტი მოცემულია სურ 4-ზე. აქ თითოეული ელემენტისათვის გამოთვლილია იმპედანსი, სიმძლავრე და S11. ასეთი ველისათვის ეწ მდგარი ტალღების კოეფიციენტი ტოლია 1,1-სა ხოლო გადატანილი სიმძლავრე 99,5%-ს შეადგენს. როგორც სურ.5 -ზე ვხედავთ ერთგვაროვანი ველი მიიღება TEM Cell -ის ცენტრალურ ნაწილში და იგი გაცილებით მეტია ვიდრე საკვლევი ბიოლოგიური ობიექტი- მოლუსკის ნერვული სისტემა.

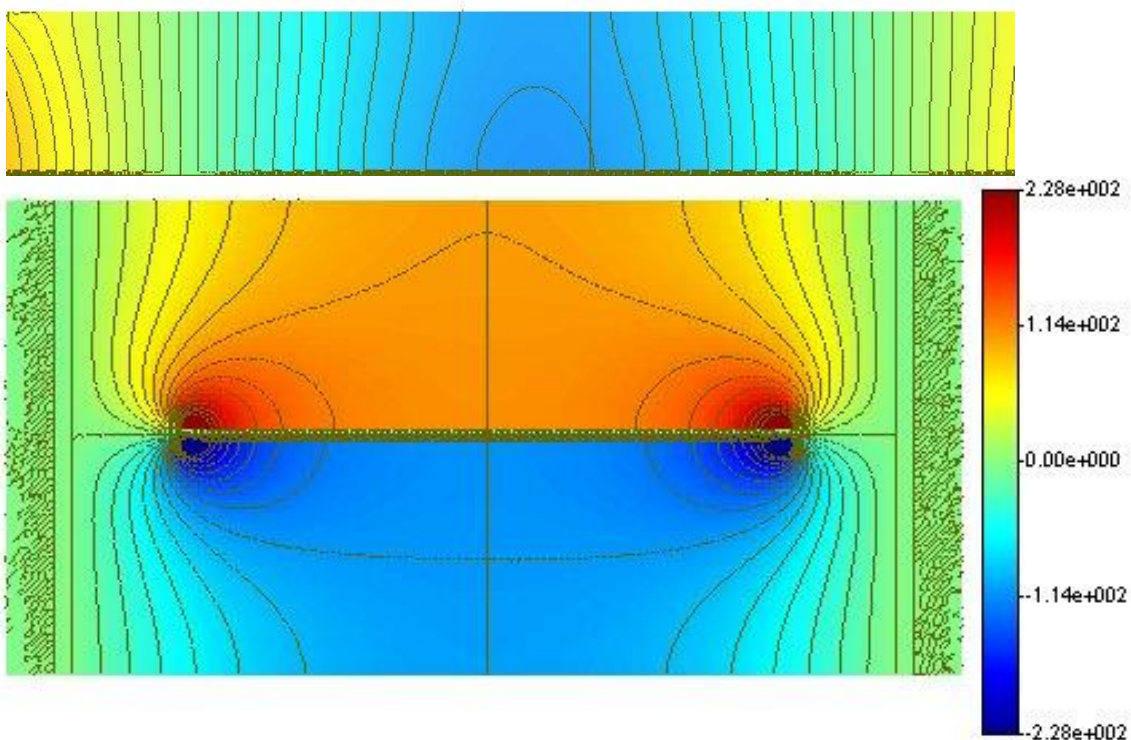


a)



b)

სურ. 4 Ez ველის გაზრცელება TEM cell –ში
ნაჩვენებია სხვადასხვა ფერის ქარგაში.



სურ. 5. ველის ერთგვაროვანი ნაწილი TEM Cell-ში.

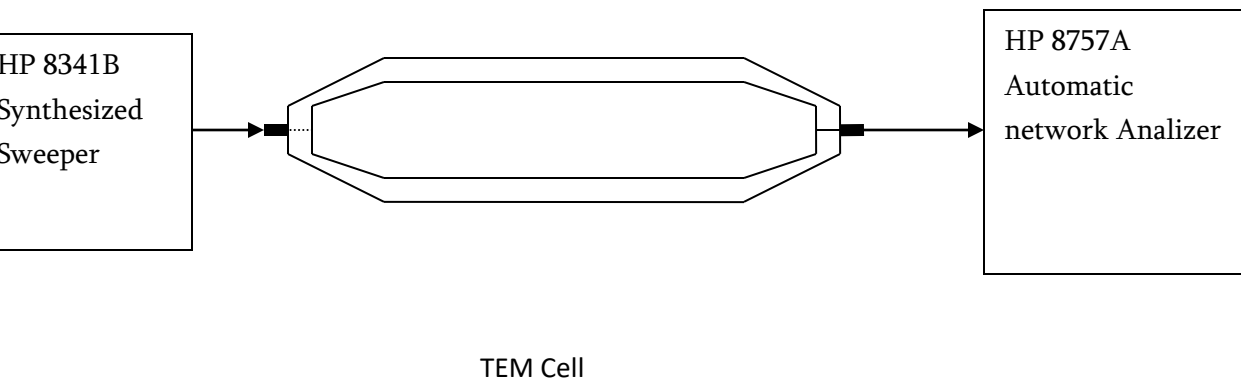
TEM Cell-ის ელექტრომაგნიტური მახასიათებლების გაზომვა



სურ. 6 შექმნილი TEM Cell -ის ფოტო მობილურ ტელეფონთან ერთად.

გაზომვები ჩატარდა HP 8757A Automatic network Analyzer და HP 8341B Synthesized Sweeper – ის გამოყენებით.

გაზომვების სქემატური გამოსახულება მოცემულია სურ. 7-ზე



სურ. 7 TEM Cell -ის გამოკვლევის სქემა

P_{in}/P_{out} გამოითვლება ფორმულით

$$P_{in}/P_{out} = 1 - [(KSW-1)/(KSW+1)]^2 =$$

$$4KSW/(KSW+1)^2$$

სადაც KSW არის მდგარი ტალღების კოეფიციენტი,

P_{in} არის TEM Cell-ში შესული ელექტრომაგნიტური ველის სიმძლავრე.

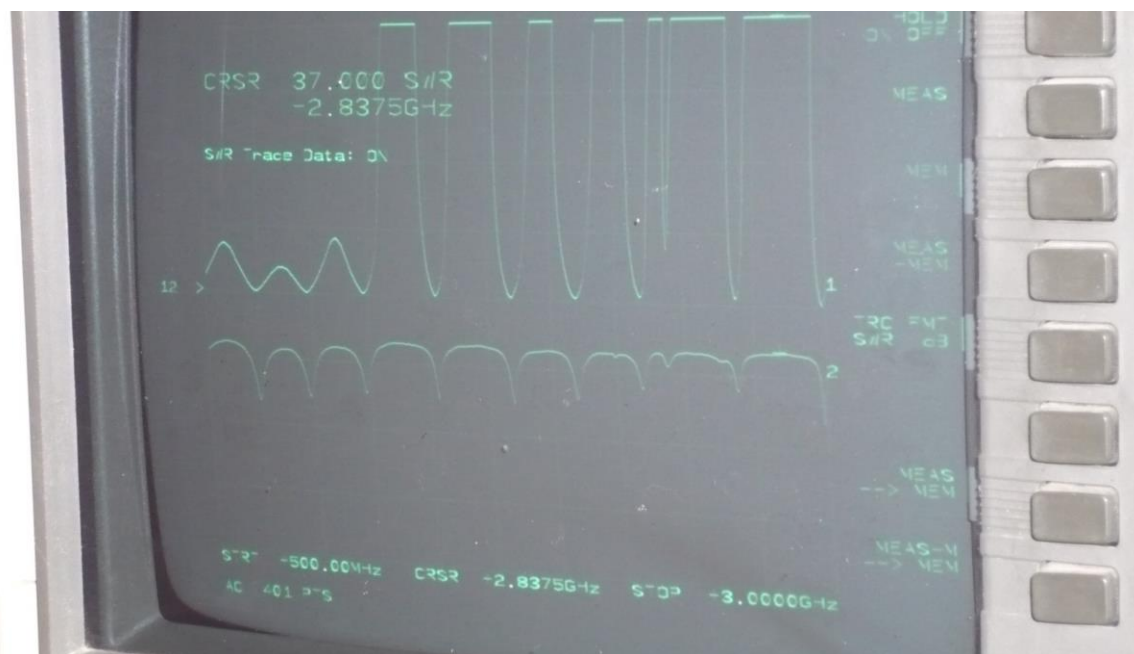
P_{out} არის –ის გამოსავალი ელექტრომაგნიტური ველის სიმძლავრე.

სურ-8 ზე ნაჩვენებია HP 8757A Automatic network Analyzer –ის ეკრანიდან გადაღებული ჩვენება, რომელიც ასახავს დამუშავებული TEM Cell-ის KSW –ბს 1700 მჰც-1900 მჰც სიხშირეების დიაპაზონში.



სურ. 8 TEM Cell-ის მდგარი ტალღის კოეფიციენტები 1700 მგჰზ-1900 მგჰც დიაპაზონში.

სურ 9 –ზე ნაჩვენებია TEM Cell –ის KSW –ბი 500 მგჰც-დან 3 გჰერც სიხშირეების დიაპაზონში.



სურ. 9. TEM Cell-ის მდგარი ტაღლის კოეფიციენტები 500 მგჰზ-3 გჰც დიაპაზონში.

ქვემოთ მოცემულია TEM Cell –ის KSW –ბი და გამოსავალ სიმძლავრეების ფარდობები შესავალ სიმძლავრეებთან სისშირეთა იმ დიაპაზონებში, რომლებიც შეესაბამებიან მობილური ტელეფონების გამოსხივების სისშირეებს.

1,77-1,92 Ghz ინტერვალი.

$f=1,847 \text{ Ghz}$

$SW=1,154$

$P_{out}/P_{in}=99,5\%$

2,27- 2,38 Ghz ინტერვალი.

$f=2,3441 \text{ Ghz}$

$KSW=1,36$

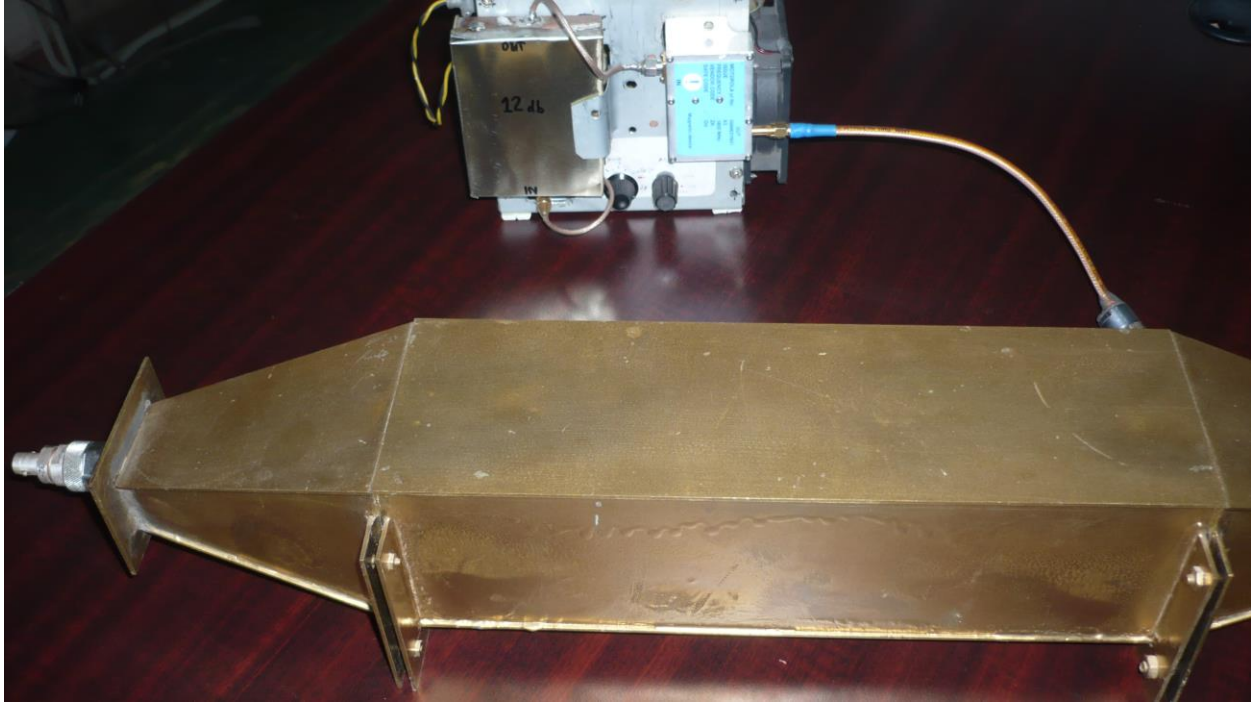
$P_{out}/P_{in}=97,7\%$

980 MHz ინტერვალი.

$KSW= 1,14$

$P_{out}/P_{in}=99,5\%$

ექსპერიმენტული ბაზის მომზადება მოიცავდა აგრეთვე 1800 მგც გენერატორის დამუშავებასა და შექმნას. გენერატორის მოდულაციის სისშირები უნდა ყოფილიყო 1-20 კც. აღნიშნული გენერატორი იქნა დამუშავებული და რეალიზებული. იხ სურ.10



სურ. 10 გენერატორი და TEM Cell.

ჰელმჰოლცის კოჭები

1-20 ჰერცი დაბალი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველების ნეირონის აქტივობაზე ზემოქმედების შესწავლის მიზნით დამუშავდა ჰელმჰოლცის კოჭები. კოჭების წვეილის ცენტრში მაგნიტური ველის მნიშვნელობა გამოითვლება ფორმულით:

$$B = \mu H \approx 0.899 \mu \frac{NI}{R}$$

სადაც:

B არის მაგნიტური ნაკადი გამოსახული გაუსებში,

: არის გარემოს მაგნიტური შეღწევადობა,

N არის ხვიათა რიცხვი

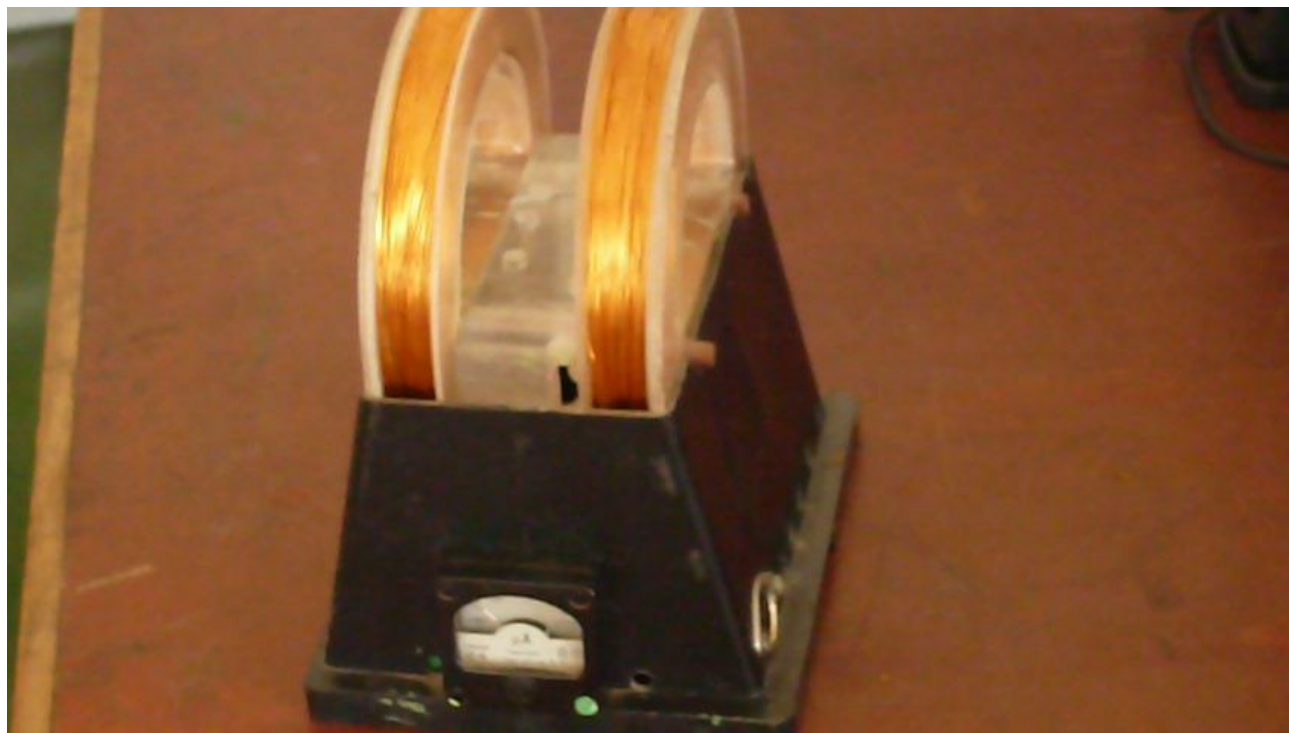
I არის დენის ძალა მავთულში.

R არის კოჭის დიამეტრი მეტრებში.

ჩვენს შემთხვევაში $N=523$, $I_{max}=1$ ამპერს. $R=0,1$ მ. ამრიგად მაქსიმალური მაგნიტური ველი ცენტრში 6 მილი ტესლაა.

SpectranNF-5035- ით კოჭებს შუა არეში სხვადასხვა წერტილებში ველის გაზომვის შედეგად დადგინდა, რომ კოჭებს შუა, ცენტრში, ველი ერთგავროვანია და მისი ზომებია 2x2x2 სმ. ეს მოცულობა ბევრად მეტია საკვლევი ბიოლოგიური ობიექტის – მოლუსკის ნერვული სისტემის ზომებზე. ერთგვაროვნება ინახება დენის ყველა მნიშვნელობისათვის.

სურათზე ქვემოთ მოცემულია შექმნილი ჰელმჰოლცის კოჭების სურათი.



სურ. 11 ჰელმჰოლცის კოჭები

ჰელმჰოლცის კოჭების კვება ხდება დაბალი სიხშირის გენერატორიდან. იმის გამო, რომ გენერატორ იძლევა უაღრესად სუსტ დენებს (მილიამპერის რიგისა) ხოლო მაქსიმალური ძაბვა 15 ვოლტის ფარგლებშია, შეიქმნა სიმძლავრის გამაძლიერებელი, რომელიც ამ დენების პიკურ მნიშვნელობას აძლიერებს 1 ამპერამდე.

ცხრილი გვიჩვენებს დენის მნიშვნელობებს შესავალ წრედსა და ჰელმჰოლცის კოჭების ხვრებში (გაძლიერებულს) და ასევე მაგნიტური ველის ინდუქციის მნიშვნელობას კოჭის შუა არეში.

ცხრილი

დენის მნიშვნელობა შესავალ წრედში მილიამპერებში	დენის მნიშვნელობა ჰელმჰოლცის კოჭების ხვრებში მილიამპერებში	მაგნიტური ველის ინდუქცია მილი ტესლებში
--	--	--

1	100	0.6
2	200	1.14
3	300	1.68
4	400	2.22
5	500	2.76
6	600	3.3
7	700	3.84
8	800	4.38
9	900	4.83
10	1000	6

ემე-ბის ცალკეულ ნეირონზე გავლენა

ტელეფონების გამოსავალი მაქსიმალური სიმძლავრე 1 ვატის ტოლია. თუმცა ეფექტური სიმძლავრე რომელსაც რეალურად გამოასხივებს ტელეფონი არ აღემატება 0,125 ვატს. ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ თავის ტვინის ის ნეირონები, რომლებიც უშუალო სიახლოვეში არიან ტელეფონის გამომსხივებელ ანტენასთან შთანთქავენ დაახლოებით 5ვატი/კგ პიკურ სიმძლავრეს. ეს შეესაბამება 5 ვატ მაქსიმალურ გამოსავალ სიმძლავრეს. გამომდინარე აქედან შესასწავლ შესავალ სიმძლავრეებად აღებულ იქნა 0,125 ვატი და 5 ვატი.

საკვლევი განგლია თავსდება პენოპლასტის მცირე კამერაში. კამერის მოცულობა 1 სმ3 –ია. კამერა ივსება რინგერის ხსნარით. პენოპლასტის ელექტრული მახასიათებლები თითქმის იდენტურია ჰაერის ელექტრული მახასიათებლებისა, ამიტომ გამოთვლებში პენოპლასტის პარამეტრები აღებულ იქნა ჰაერის პარამეტრების ტოლად. თითოეულ ექსპერიმენტში განისაზღვრებოდა ექსპოზიციაში მყოფი პრეპარატის კოორდინატები, რაც საჭიროა განგლიისა და ცალკეული ნეირონის მიერ შთანთქმული კუთრი სიმძლავრის ე.წ. SAR გამოსათვლელად. ასევე გამოითვლებოდა ტემპერატურის ნაზრდი, რომელიც ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ ნეირონის ექსპოზიციის შედეგია. SAR–სა და ტემპერატურის ნაზრდის გამოთვლა ხდება FDTD მეთოდის გამოყენებით კომპიუტერში.

ექსპერიმენტების სერიაში ადგილი ჰქონდა ნეირონის სტიმულაციას უჯრედშიგა მასტიმულირებელი იმპულსებით და უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ველის ზეგავლენის შესწავლას ნეირონის რეაქციებზე აღნიშნული სახის სტიმულირების მიმართ. ნეირონის უჯრედშიგა დენით სტიმულირებისათვის გამოყენებულ იქნა ხელსაწყო Picoampere source K 261. დამუშავდა სპეციალური მწვევტარა, რომელიც განაპირობებს მასტიმულირებელი დენის იმპულსებად გადაქმნას. მწვევტარას აქვს წვევტის დროის რეგულირების საშუალება, რაც განაპირობებს მასტიმულირებელ უჯრედშიგა იმპულსთა ხანგრძლივობის რეგულირების საშუალებას. იმპულსების ხანგრძლივობა

იცვლებოდა 4 მილიწამიდან 20 მილიწამამდე. უმეტეს შემთხვევაში აიღებოდა 4 მილიწამი. ეს დრო ბევრად ნაკლებია ქმედების პოტენციალის წინმსწრებ ლატენტურ დროსთან შედარებით და ამრიგად ნებისმიერი რეაქცია მხოლოდ ნეირონში მიმდინარე პროცესებზე არის დამოკიდებული.

ნეირონის სტიმულზე რეაქციების რეგისტრაციისა და უჯრედშიგა სტიმულაციისათვის ხდებოდა ნეირონში ორი მიკროელექტროდის შეყვანა. ერთერთ მათგანზე მიეწოდება დენის იმპულსები, ხოლო მეორე მათგანით ხდება რეგისტრაცია. მიკროელექტროდების ნეირონში შეყვანისას ნეირონის დაზიანების თავიდან ასაცილებლად გამოიყენება ორი პიეზო მიკრომანიპულიატორი PM-20, რომელიც განაპირობებს მიკროელექტროდების მყისიერ და დაუზიანებელ შესვლას ნეირონში. გამაძლიერებლის გამოსავალი მიერთებულია მონაცემთა აღების სისტემა Powerlab Data acquisition System–თან "Powerlab 4-30", რომელიც აღჭურვილია "Chart 5" პროგრამით.

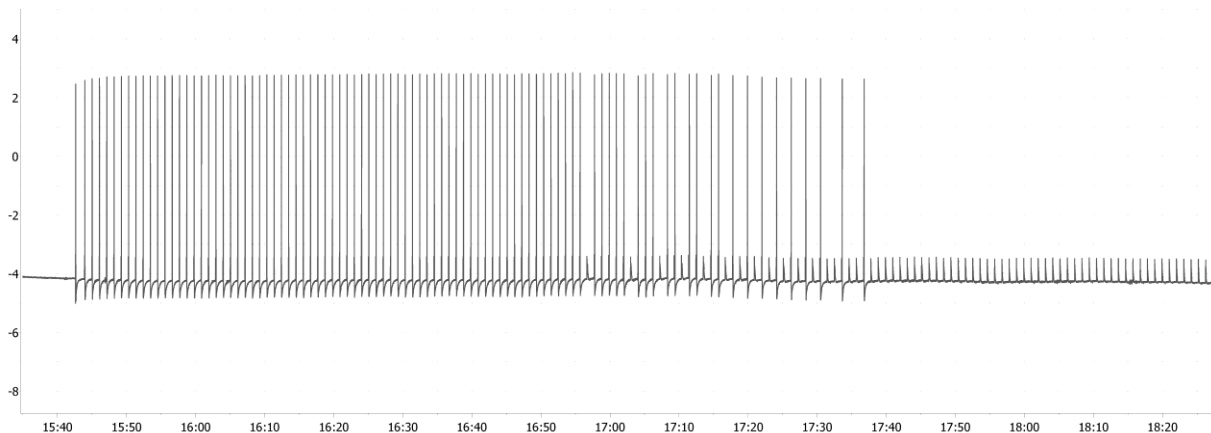
მოლუსკის ნერვული სისტემის აღება კვლევის ობიექტად იმითაა საინტერესო რომ, ჯერ ერთი ამ ნეირონების ყველა ძირითადი ბიოფიზიკური და ელექტროფიზიოლოგიური პროცესი და მახასიათებელი იდენტურია უმაღლესი განვითარების ცხოველთა ანალოგიურ პროცესებსა და პარამეტრებთან. მეორე და მთავარი ისაა, რომ მოლუსკის ცენტრალურ ნერვულ სისტემაში არიან იდენტიფიცირებადი ნეირონები. მათი ზომა 150-200 მიკრონს აღწევს. ამასთანავე მათი მდებარეობა შეფერილობა და სხვა ყველა მახასიათებელი განმეორებადია პრეპარატიდან პრეპარატამდე. ეს საშუალებას იძლევა ექსპერიმენტის პირობები იყოს იდენტურნი.

მიჩვევა (ჰაბიტუაცია) აღებულ იქნა როგორც ცალკეული ნეირონის დონეზე ინფორმაციის შენახვის (დასწავლის) მოდელი.

საკონტროლო ნეირონების უჯრედშიგა სტიმულაცია და შესაბამისი რეაქციები.

ექსპერიმენტის დასაწყისში ნეირონის გაღიზიანება ხდებოდა 0,01 ნა ამპლიტუდის მქონე უჯრედშიგა იმპულსებით. ცდებით დადგინდა, რომ ასეთი ამპლიტუდის მქონე მასტიმულირებელი იმპულსები ვერ იწვევენ ნეირონის ისეთ აღგზნებას, რომ ნეირონმა სტიმულს უპასუხოს ქმედების პოტენციალის გენერირებით. შემდეგ ხდებოდა მასტიმულირებელი იმპულსების ამპლიტუდის თანდათანობითი მომატება მანამდე, ვიდრე ნეირონი მათ არ უპასუხებდა ქმედების პოტენციალის გენერირებით. ასეთი სტიმულაცია განაპირობებდა ერთ მასტიმულირებელ უჯრედშიგა იმპულსზე ერთი ქმედების პოტენციალის გენერირებას. სტიმულირების ასეთი წესი შეიძლება განხილულ იქნას როგორც ნეირონისათვის ინფორმაციის გადაცემის მოდელი. ნეირონის რეაგირებს სტიმულზე გარკვეული დროის განმავლობაში, შემდეგ იწყება ზოგიერთი სტიმულის უპსუხოდ გამოტოვება, ხოლო ბოლოს დგება სტიმულისადმი სრული მიჩვევა, რაც იმაში გამოიხატება, რომ ნეირონი აღარ პასუხობს სტიმულებს ქმედების პოტენციალის გენერირებით.

სურ 12-ზე საილუსტრაციოდ ნაჩვენებია ერთერთი იდენტიფიცირებული ნეირონის სტიმულის მიმართ მიჩვევის დინამიკა.



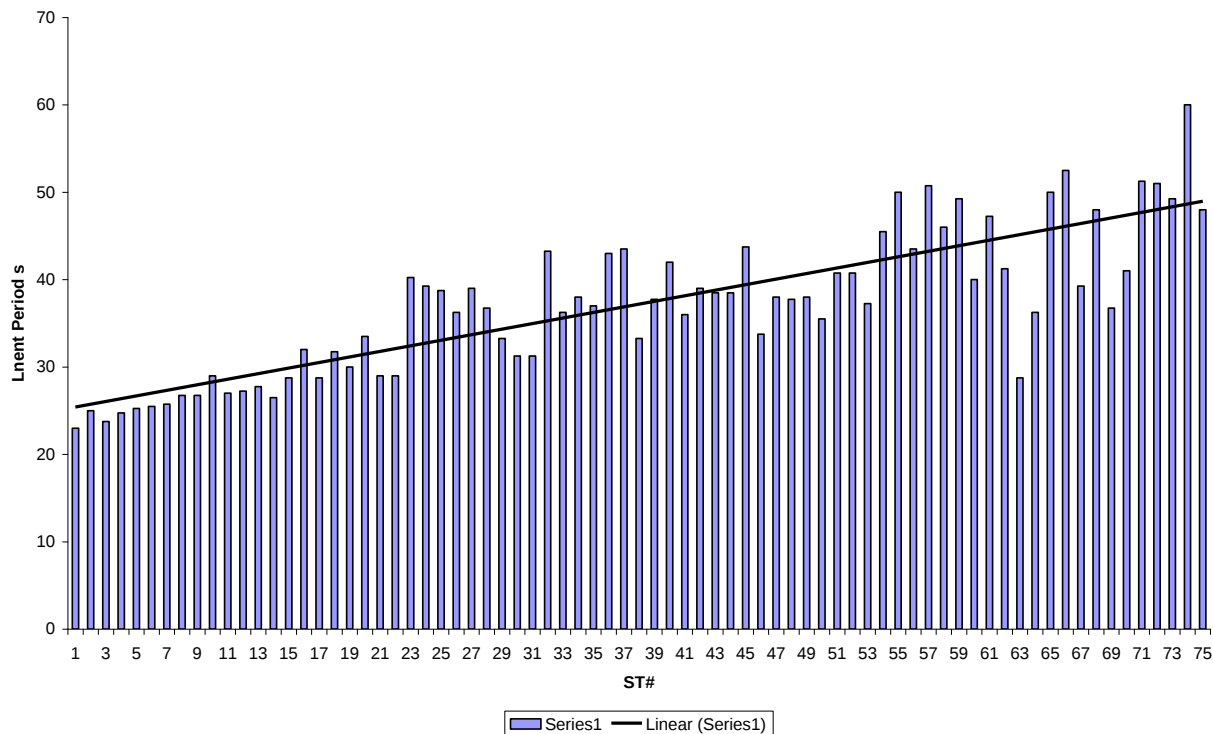
სურ. 12 **RPG#3** ნეირონის მიხვევა 0,1 ნა ამპლიტუდის მქონე უჯრედშიგა იმპულსებით სტიმულაციაზე. სრული მიხვევა განხორციელდა 2 წუთის განმავლობაში სტიმულაციის შემდეგ.

მასტიმულირებელ იმპულსთა ხანგრძლივობა 4 მილიწამია. თითოეული უჯრედსშიგა მასტიმულირებელი იმპულსი იწვევს ან ქმედების პოტენციალების აღმოცენებას, ან ატრეფაქტს (მცირე კბილანებს) ჩანაწერზე. ამიტომ მასტიმულირებელი იმპულსები უშუალოდ არაა ნაჩვენები. აბცისათა ღერძზე გადაზომილია დრო წმ; ორდინატთა ღერძზე პოტენციალთა სხვაობა ვოლტებში. გამაძლიერებლის გაძლიერების კოეფიციენტი 100-ის ტოლია. გამომდინარე აქედან ქმედების პოტენციალთა ამპლიტუდა 70 მილივოლტის ტოლია.

ნეირონის მიერ სტიმულზე ქმედების პოტენციალით პასუხის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია სტიმულის ამპლიტუდაზე, უჯრედშიგა იმპულსების მიწოდების სიხშირეზე და თითოეული იმპულსის ხანგრძლივობაზე. რაც მეტია ეს ამპლიტუდა მით გვიან დგება მიხვევა. თუ ამპლიტუდა ძალიან მაღალია, (რამოდენიმე ნა) მაშინ მიხვევა შეიძლება არ დადგეს. უჯრედშიგა იმპულსების ხანგრძლივობის გაზრდა ადიდებს მიხვევისათვის საჭირო დროს, თუმცა მიხვევა ყოველთვის დგება, მაშინაც კი, თუ ამ იმპულსთა ხანგრძლივობა უსასრულოა, ე.ი. ნეირონს ვალიზიანებით არა იმპულსებით არამედ მუდმივი დენით. მიხვევისათვის საჭირო დრო უკუპროპორციულია ზემოთ აღნიშნული სიხშირისა- რაც ნაკლებია ეს სიხშირე, მით გვიან დგება მიხვევა. მიხვევის დადგომისას სტიმულაციას ვწყვეტთ. სტიმულაციის განახლება რამოდენიმე წუთის შემდეგ არ იწვევს ამ სტუმულზე ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალებით პასუხს, ე.ი. ადგილი აქვს ინფორმაციის შენახვას. დრო, რომელშიც ხდება აღნიშნული ინფორმაციის შენახვა ვარირებს ნეირონიდან ნეირონამდე, ასევე დამოკიდებულია მასტიმულირებელ უჯრედსშიგა იმპულსების ამპლიტუდაზე პირდაპირ პროპორციულად. სტიმულზე ქმედების პოტენციალებით რეაქციის უნარის აღდგენას საშუალოდ სჭირდება 20-30 წუთი. ხელმეორედ იგივე უჯრედსშიგა იმპულსებით სტიმულირების შემთხვევაში სრული მიხვევის დადგომისათვის საჭირო დრო მცირდება. სტიმულაციის სერიების მრავალჯერადი განმეორების შემთხვევაში შეიძლება მიღწეულ იქნას მდგომარეობა, როდესაც ნეირონა არ გენერირებს ქმედების პოტენციალებს მოცემული ამპლიტუდის მქონე უჯრედსშიგა დენის იმპულსებზე. ი.ე. ხდება ინფორმაციის სრული დასწავლა.

მიხვევის დროის გარდა ნეირონის უჯრედსშიგა იმპულსებით სტიმულაციაზე მიხვევა შეიძლება დახასიათდეს ქმედების პოტენციალების წინმსწრები ლატენცური დროით და მათი აღმოცენების ზღურბლით. აღნიშნული ლატენცური დრო არ არის მუდმივი და განიცდის არარეგულარულ ცვალებადობას, თუმცა შეიმჩნევა ზრდის ტენდენცია. სურ

13-ზე მოცემულია ერთერთი ნეირონის ქმედების პოტენციალთა ლატენტური დროები მისი უჯრედშიგა იმპულსებით სტიმულაციის დროს.

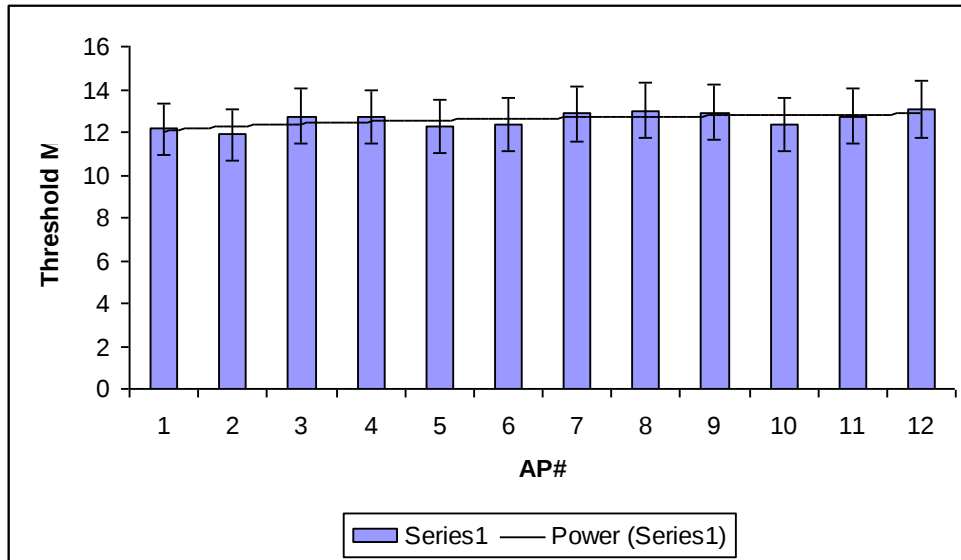


სურ. 13 ლატენტური დროების დამოკიდებულება უჯრედშიგა დენის იმპულსის (სტიმულის= ST) ნომერზე, სტიმულის ნომერი ემთხვევა ქმედების პოტენციალის ნომერს.

აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია სტიმულის ნომერი.

ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია ლატენტური პერიოდის დრო მილიწამებში. ტენდენცია გამოსახულია შავი უწყვეტი ხაზით. ზრდის ტენდენცია აშკარაა.

ზღურბლის მნიშვნელობა, მსგავსად ლატენტური პერიოდისა, განიცდის არარეგულარულ ცვალებადობას, მაგრამ ზრდის ტენდენცია არ შეინიშნება. სურ. 14-ზე ნაჩვენებია ზღურბლის მნიშვნელობის დამოკიდებულება ქმედების პოტენციალის ნომრისაგან.

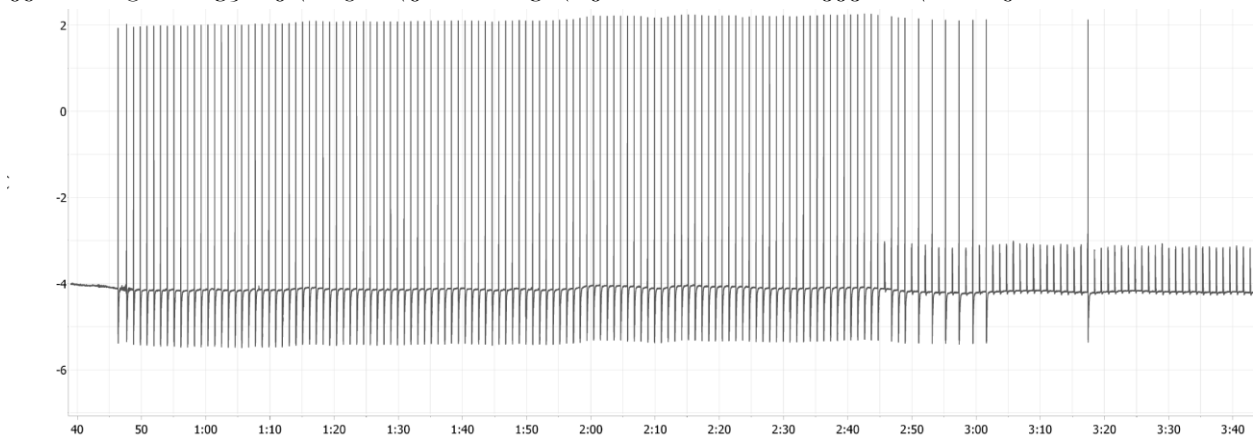


სურ. 14 ზღურბლის მნიშვნელობის დამოკიდებულება ქმედების პოტენციალის ნომრისაგან. ზღურბლის ვარაიაციები არაა დიდი. ტენდენცია გამოსახულია უწყვეტი შავი ხაზით. ეხედავთ რომ ტენდენცია მუდმივობისკენაა.

უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ ექსპოზირებულ ნეირონების უჯრედშიგა სტიმულაცია და შესაბამისი რეაქციები.

როგორც ზემოთ ნაჩვენები იქნა, სტიმულაციის სერიების განმეორების შემთხვევაში სტიმულაციის ყოველ მიმდევრო სერიის მიმართ ნეირონის რეაქციები კლებულობს. გამომდინარე აქედან დასხივებული ნეირონების სტიმულაცია უჯრედშიგა დენის იმპულსებით ხდებოდა მხოლოდ ერთხელ. შედარება ხდებოდა დასხივებული ნეირონების მიხვევის დინამიკასა და საკონტროლო ნეირონის მიხვევის დინამიკას შორის სტიმულაციის მხოლოდ პირველი სერიებისათვის.

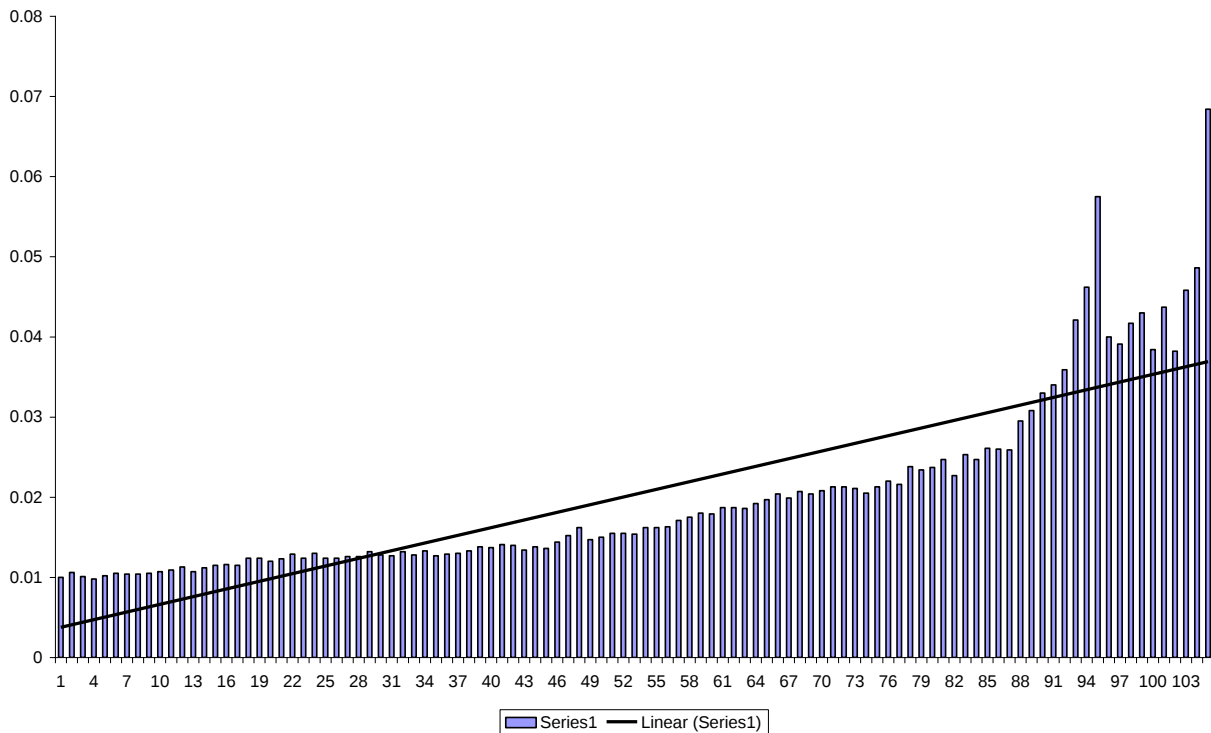
სურ 15-ზე ნაჩვენებია ერთერთი ნეირონის, რომელიც დაქვემდებარებულია TEM Cell-ში ექსპოზიციას, უჯრედშიგა დენის იმპულსების მიმართ მიხვევის დინამიკა.



სურ. 15. დასხივებულ ნეირონის მიხვევა უჯრედშიგა დენის იმპულსებით სტიმულირების მიმართ. ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ ექსპოზიცია მოხდა TEM Cell-ში. დასხივების რეჟიმი-არამოდულირებადი (უწყვეტი) ელექტრომაგნიტური ველი. შესავალი სიმძლავრე – 0,125 ვატი. ექსპოზიციის დრო 60 წუთია. შთანთქმის კუთრი თანრიგი-SAR= 0,9 ვატი/კგ. ტემპერატურის

ნაზრდი = $0,1^{\circ}\text{ C}$. თითოეული მასტიმულირებელი იმპულსის ხანგრძლივობა 4 მილიწამის ტოლია. სრული პაბიტუაციის დადგა 2 წუთსა და 30 წამში, რაც ოდნავ მეტია ვიდრე სურ 1-ზე აღწრილ შემთხვევაში.

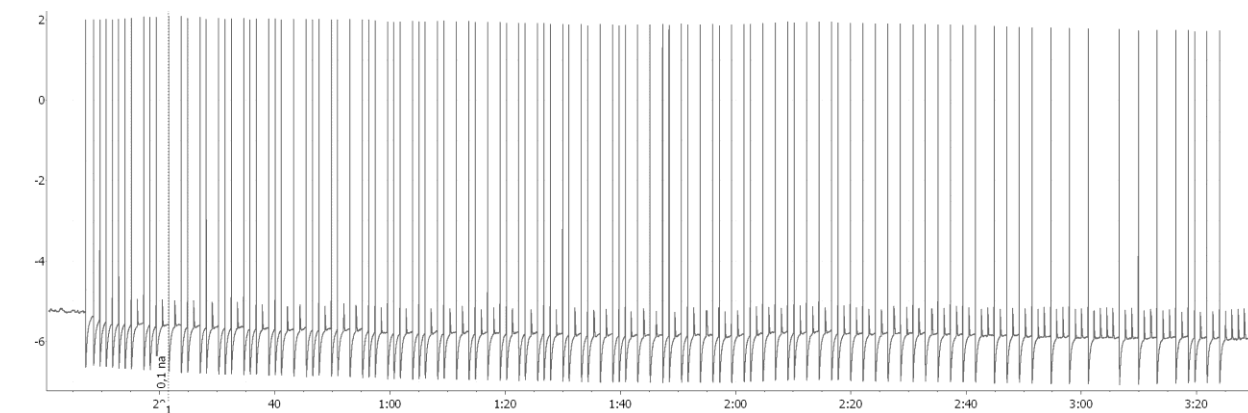
საკონტროლო ნეირონების მსგავსად, დასხივებულ ნეირონთა შემთხვევაშიც, ლატენტური პერიოდი განიცდის არარეგულარულ რხევას, რომელსაც ზრდის ტენდენცია აქვს. სურათ 16-ზე ნაჩვენებია ერთერთი ასეთი დამოკიდებულება ლატენტურ პერიოდსა და ქმედების პოტენციალის ნომერს შორის დასხივებული ნეირონისათვის.



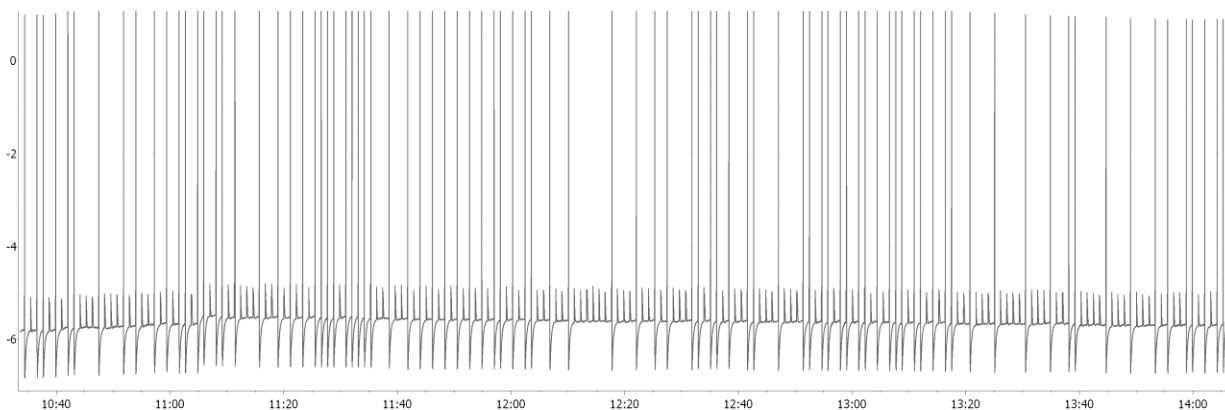
სურ. 16. ლატენტური პერიოდის დამოკიდებულება ქმედების პოტენციალის ნომერზე. შეინიშნება ლატენტური პერიოდის არარეგულარული რხევა ზრდადობის ტენდენციით. ნეირონი LPG#3 TEM Cell-ში დაექვემდებარა დაასხივებას 60 წუთის განმავლობაში. შესავალი სიმძლავრე შეადგენს $0,125$ ვატს. დასხივება – უწყვეტ რეჟიმში. შთანთქმის კუთრი სიდიდე $SAR=0,9$ ვატი/კგ. ტემპერატურის ნაზრდი $0,1^{\circ}\text{ C}$. აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია სტიმულის ნომერი, ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია დრო წამებში.

ზღურბლის დამოკიდებულება ქმედების პოტენციალის ნომრის მიმართ დასხივებული ნეირონებისათვის მსგავსია საკონტროლო ნეირონების იგივე დამოკიდებულებისა. გამოთვლები გვიჩვენებენ, რომ შთანთქმის კუთრი თანრიგი - SAR დამოკიდებულია შესავალ სიმძლავრეზე, რომელიც მიეწოდება TEM Cell-ს. მეორეს მხრივ, ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ როდესაც ხდება მობილური ტელეფონის გამოსხივების შთანთქმა თავის ტვინის ნეირონების მიერ, ეს შთანთქმა არათანაბარია. კერძოდ, ტელეფონის მდებარეობის მიმართ უახლოესი ნეირონები შთანთქავენ გაცილებით მეტ სიმძლავრეს, ვიდრე ტვინის სიღრმისეული ნეირონები. გამომდინარე აქედან, მომდევნო ექსპერიმენტის სერიებში TEM Cell-ის შესავალზე სიმძლავრე გაზრდილ იქნა 5 ვატამდე.

სურ. 17-ზე ნაჩვენებია ერთერთი ნეირონის რეაქციების დინამიკა უჯრედშიგა დენის იმპულსებით სტიმულაციის მიმართ, როდესაც იგი დაექვემდებარა ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას 5 ვატი შესავალი სიმძლავრით TEM Cell-ში.



ა



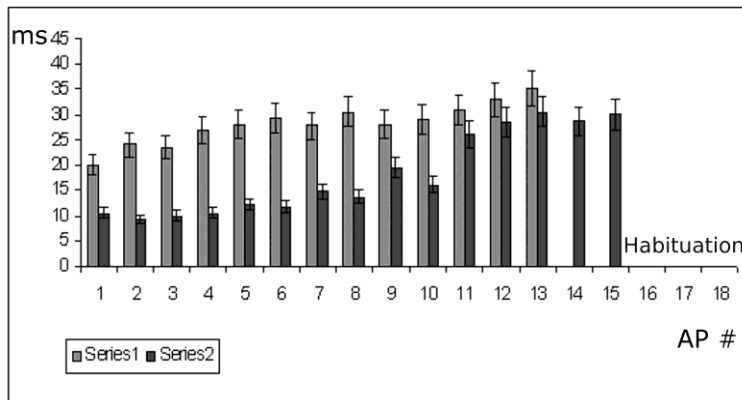
ბ

სურ. 17. LPG #3 ნეირონის რეაქციები 0,1 ნა ამპლიტუდის მქონე უჯრედშიგა დენის იმპულსებით სტიმულაციის მიმართ. TEM Cell-ში ელექტრომაგნიტური ველის შესავალი სიმძლავრე შეადგენს 5 ვატს. ექსპოზიციის დრო 60 წუთი. დასხივების რეჟიმი არის არამოდულირებადი უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ველი. გამოთვლილი $SAR=5,3$ ვატი/კგ. ტემპერატურის ნაზრდი $4,8^{\circ}C$ ტოლია.

ა) ნეირონის რეაქციები სტიმულაციის დასაწყისში.

ბ) ნეირონის რეაქციები სტიმულაციის 14-ე წუთზე. აშკარაა, რომ მიხვევა არ ჩამოყალიბდა 14 წუთიანი სტიმულაციის ფონზეც კი. მიხვევის დათრგუნვა აშკარაა.

ლატენცური პერიოდზე დაკვირვებამ გამოააშკარავა, რომ გაზრდილი შესავალი სიმძლავრის პირობებში საშუალო ლატენცური პერიოდი შემცირებულია საკონტროლო ნეირონების საშუალო ლატენცურ პერიოდთან შედარებით. სურ. 18 ზე ნაჩვენებია ქმედების პოტენციალის ნომრიდან ლატენცური პერიოდების დამოკიდებუკლებები დახივებული და დაუსხივებელი ნეირონებისათვის.



სურ. 18 ნეირონები -- ორივე *RPG#3*. ლატენცური პერიოდის დამოკიდებულება ქმედების პოტენციალის ნომრიდან საკონტროლო ნეირონისათვის (*Series 1*) და დასხივებული ნეირონისათვის (*Series 2*). ორივე ნეირონისათვის ლატენცურ პერიოდის ტენდენცია ზრდადია, თუმცა აშკარაა, რომ დასხივებული ნეირონისათვის საშუალო ლატენცური პერიოდი მნიშვნელოვნად მცირეა საკონტროლო ნეირონის შესაბამის საშუალო ლატენცურ პერიოდთან შედარებით. დასხივებული ნეირონისათვის *TEM Cell*-ში ექსპოზიციის ხანგრძლივობა შეადგენს 60 წუთს. შესავალი სიმძლავრე 5 ვატი. *SAR 5,1* ვატი/კგ. ტემპერატურის ნაზრდი შეადგენს 5° C.

შედგენი 1800 მგ/კ სისხირის უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ველის ნეირონის უჯრედშიგა სტიმულაციაზე მიჩვევის პროცესზე გავლენის შესახებ:

შესავალი სიმძლავრის 0,125 ვატი მნიშვნელობისას ცალკეულ ნეირონის მიერ შთანთქმული ენერგიისათვის შთანთქმის კუთრი თანრიგი - *SAR 1* ვატი/კგ-მდეა. ასეთი ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედება არ იწვევს ნეირონის მიჩვევის დინამიკის მნიშვნელოვან შეცვლას საკონტროლო ნეირონებთან შედარებით. ორივე შემთხვევაში თითქმის ტოლია მიჩვევისათვის საჭირო დრო.

შესავალი სიმძლავრის 5 ვატის პირობებში შთანთქმის კუთრი თანრიგი-*SAR* მნიშვნელობა 5 ვატი/კგ ფარგლებშია. ნეირონის მიერ სიმძლავრის შთანთქმის პროცესი თერმულია, რადგან ტემპერატურის ნაზრდი მნიშვნელოვანია და 5°C ფარგლებშია. ასეთი დასხივება ცვლის ნეირონის მიერ სტიმულზე რეაქციის დინამიკას და თრგუნავს ნეირონის მიჩვევის უნარს.

1800 მგ/კ სისხირის უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ტალღის ნეირონის სინაფსურ სტიმულაციაზე მიჩვევის პროცესზე გავლენა.

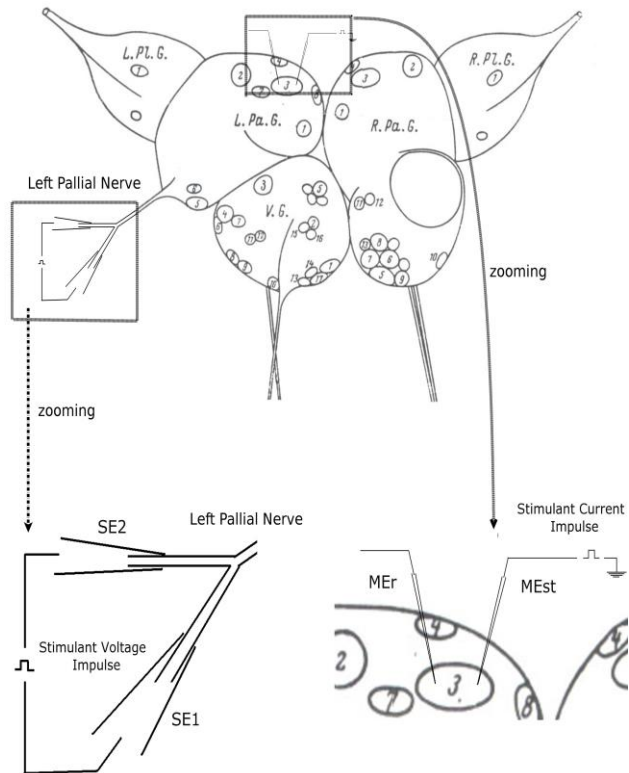
ადამიანისა თუ ცხოველის ტვინში ნეირონები ურთირთქმედებენ ერთმანეთთან და გადაცემენ ინფორმაციას სინაფსური კავშირების საშუალებით. თუ განვიხილავთ ორი ნეირონისაგან შემდგარ სისტემას, რომლებიც სინაფსური კავშირითაა დაკავშირებული, ვნახავთ, რომ თითოეული მათგანის ცალკე ცალკე აღგზნების პირობებში აღგზნება გადაეცემა მხოლოდ ერთი ნეირონიდან მეორეს, მაშინ როცა პირუკუ აღგზნებას აღვიღი არ აქვს. პურუკუ აღგზნება შეიძლება განხორციელდეს მხოლოდ იმ

შემთხვევაში როდესაც არსებობს მეორე სინაფსიც, ოდონდ მიმართული მეორე ნეირონიდან პირველისაკენ. ამრიგად, ერთი ნეირონიდან აღგზნება რომ გადაეცეს მეორე ნეირონს საჭიროა ეს აღგზნება აღიძვრას ჯერ პირველ ნეირონში. ეს გამოიწვევს ქმედების პოტენციალების სერიის გაჩენას პირველ ნეირონში. როდესაც ეს პოტენციალები მიაღწევენ სინაფსს, ისინი გამოიწვევენ სინაფსურ ჭრილში ნეირომედიატორის გამოყოფას. ნეირომედიატორი თავის მხრივ იწვევს მომდევნო ნეირონის მემბრანის (ე.წ. პოსტსინაფსური მემბრანის) დეპოლარიზაციას და ზღურბლის მიღწევის შემთხვევაში ქმედების პოტენციალის(ების) გენერაციას. შემაჯავალ იმპულსთა ქარგაში ჩაწერილია პრესინაფსური ნეირონიდან მომდინარე ინფორმაცია.

ცოცხალი არსებები ცხოვრობენ განუწყვეტლივ ცვალებად გარემოში. მათ უწევთ ამ ცვლილებებთან შეგუება. ევოლუციის პირობებში ის ორგანიზმები, რომლებსაც გამოუმუშავდათ შეგუების უნარი გადარჩნენ, ხოლო ამ უნარის არა მქონენი გადაშენდნენ. ნერვული სისტემის მქონე ცხოველებში შეგუებადობას განაპირობებს მათი ნერვული სისტემა და ტვინი. ტვინის აქტივობა ხასიათდება დასწავლის უნარით. ინფორმაციის დასწავლა ანუ შენახვა მნიშვნელოვანწილადაა დაკავშირებული ტვინში მიმდინარე პლასტიურ გარდაქმნებთან. პლასტიურობა გვხვდება სხვადასხვა დონეზე დაწყებული მთელი ტვინიდან და დამთავრებული ცალკეული ნეირონით თუ ამ ნეირონის ქვე დონეებით. პლასტიური ცვლილებები მოიცავენ ორ ასპექტს, ერთია მიწოდებული სტიმულის განმეორების პირობებში რეაქციის გაძლიერება ანუ ფასილიტაცია, ხოლო მეორე პირიქით- მიწოდებული სიგნალების გამეორების პირობებში რეაქციის შესუსტება და ჩაქრობა ანუ ჰაბიტუაცია. ჰაბიტუაციას ასევე მოიხსენებენ ე.წ. ნეგატიური დასწავლის სახელითაც. იმის გამო რომ ნეირონიდან ნეირონში ინფორმაცია გადაეცემა სინაფსური კავშირების საშუალებით ჰაბიტუაციის მიზეზი სინაფსებში უნდა ვეძებოთ. სინაფსურ ჰაბიტუაციას ორი გამოვლინება აქვს – პრესინაფსური და პოსტსინაფსური. პრესინაფსური გამოვლინებისას ადგილი აქვს შემდეგ პირობებს: სტიმულის განმეორების პირობებში ხდება გადამცემ ნეირომედიატორის სულ უფრო მეტად გამოყოფა. თუ სტიმულაცია დიდხანს გრძელდება მოხდება მედიატორის გამოღევა. ამის გამო შემომავალი ქმედების პოტენციალება აღარ არიან ეფექტურნი, რათა გამოიწვიონ მედიატორის გამოყოფა და მაშასადამე მომდევნო ნეირონია აღგზნება. გაცილებით რთული მექანიზმები უდევს საფუძვლად პოსტსინაფსურ ჰაბიტუაციას. რადგან ამ შემთხვევაში ხდება პოსტსინაფსური მემბრანის დესენსიტიზაცია, რის გამოც შემომავალი აღგზნება აღარაა საკმარისი რათა აღაგზნოს ნეირონი და გამოიწვიოს ქმედების პოტენციალთა გენერირება.

დასახული ამოცანის გადასაწყვეტად შემდეგი მეთოდიკა იქნა შემუშავებული: თავდაპირველად ხდება ცხოველის ტვინისა (ნერვული განგლიების) და მისი მკვებავი აფერენტული ნერვების ამოკვეთა. ეს იზოლირებული განგლიები თავსდება რინგერის ხსნარში, რომლის შემადგენლობაა: NaCl 80 მოლ ; KCl 4მოლ ; CaCl₂ 7მოლ ; MgCl₂ 5მოლ ; Tris-HCl buffer 5მოლ ; pH=7,5. საკვლევად აღებულ იქნა იდენტიფიცირებადი გიგანტური ნეირონები. მათი ელექტროფიზიოლოგიური და ბიოფიზიკური პარამეტრები განმეორებადი არიან ცხოველიდან ცხოველში. ეს საშუალებას გვაძლევს შევადგინოთ საიმედო სტატისტიკური სურათი დასახული ამოცანის გადასაჭრელად. ნეირონების სინაფსური გზით სტიმულაციისათვის შევიმუშავებულ იქნა შემდეგი სახის მეთოდიკა: ვახდენთ რომელიმე აფერენტული ნერვის სტიმულაციას ძაბვის იმპულსებით. მიწოდებული სტიმულაცია სინაფსური გზით გადაეცემა საკვლევ ნეირონს. ნეირონის სტიმულზე რეაქციების შესასწავლად შერჩეულ საკვლევ ნეირონში თავსდება მიკროელექტროდი.

ექსპერიმენტის სქემა მოცემულია სურ. 19-ზე ქვემოთ.



სურ. 19 განგლიების სქემატური გამოსახვა. იდენტიფიცირებული გიგანტური ნეირონები აღნიშნულია ციფრებით. პირველი გაფართოება სქემატურად გვიჩვენებს ნეირონის უჯრეშია რეგისტრაციისა და სტიმულაციის სქემას, მეორე გაფართოება სქემატურად გვიჩვენებს ნერვის სტიმულაციას შემწოვი ელექტროდების საშუალებით.

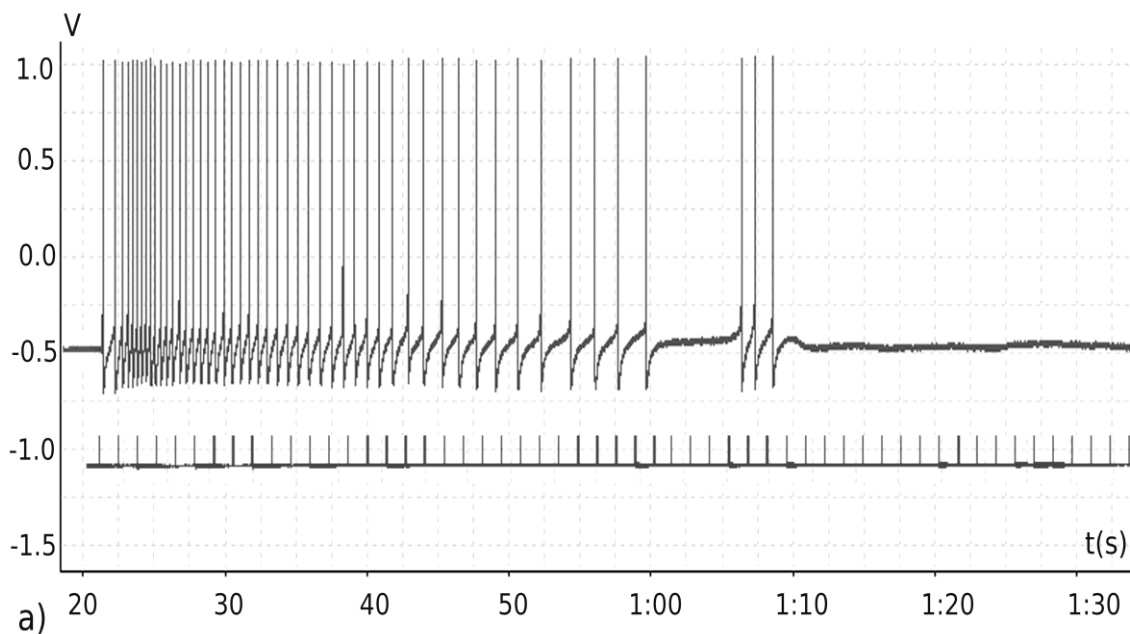
თუ განგლიების აფერენტული ნერვები, რომელსაც უნდა მიეწოდოს სტიმულაცია, არ იქნება სითხეში (მარილ ხსნარში) მოთავსებული, მაშინ ისინი ძალიან სწრაფად გამოშრებიან და დაკარგავენ სიცოცხლის უნარიანობას. მეორეს მხრივ, თუ კი სითხეში მოთავსებულ ნერვს დავაკონტაქტებთ გამტართან ძაბვის იმპულსების მოსაღებად და მოვდებთ ძაბვას აღზნების ეფექტს ვერ მივიღებთ. ამის მიზეზი კი ისაა, რომ ნერვები მარილხსნარით დაშენებული აღმოჩნდება, რომლის წინააღობა გაცილებით ნაკლებია ნერვის წინააღობასთან შედარებით. გაზომვებმა გვაჩვენეს, რომ ნერვის წინააღობა რამოდენიმე ასეული კილომის რიგისაა, მაშინ როცა მარილხსნარის წინააღობა არ აღემატება ომის მეათედ ნაწილებს. ამ წინააღმდეგობის გადასაღახავად შევიძუშავეთ შემწოვი ელექტროდების სიტემა, რომლის არსი შემდეგია: ვიღებთ მინის კაპილარს, რისგანაც ჯერ მზადდება მიკროელექტროდი, შემდეგ ხდება წვერის წაკვეთა ისე, რომ მასში ნერვის შეწოვისას ნერვმა სრულად შეავსოს ელექტროდის მთელი სივრცე. ასეთ შემთხვევაში ელექტროდის შიგ მოთავსებულ ხსნარსა და რინგერის ხსნარს შორის ელექტრული კონტაქტი მხოლოდ ნერვის საშუალებით განხორციელდება.

დასახული ამოცანის გადასაჭრელად უადრესად დიდი მნიშვნელობა აქვს ექსპერიმენტის ზუსტ განმეორებადობას, რათა დადგინდეს შესაძლო განსხვავება საკონტროლო ნეირონების რეაქციებისა და ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ ექსპოზირებულ ნეირონებს შორის. ამისათვის სტიმულაციის პირობები ზუსტად განსაზღვრული და

განმეორებადი უნდა იყოს. შემჩნეულ იქნა, რომ მარცხენა პალიალური ნერვი კუნთთან ინერვაციის მიდამოში იყოფა ორ ნაწილად. გამომდინარე აქედან სტიმულაციისათვის ვიღებთ ორ შემწოვ ელექტროდს, რომლებშიც შეიწოვება მარცხენა პალიალური განგლიის ეს ორი განშტოება. ექსპერიმენტის იდენტიფიცირებადობისათვის რჩება მხოლოდ ამ ნერვების მასტიმულირებელ სიგნალთა იდენტიფიცირება. ამის გადასაწყვეტად ვიყენებთ ჩვენს მიერ კონსტრუირებულ სტიმულატორს. სტიმულატორი იძლევა საშუალებას მივიღოთ სხვადასხვა სიხშირით დაბვის იმპულსები. დაბვის იმპულსების ხანგრძლივობა და ამპლიტუდა რეგულირებადია სურვილისამებრ.

სინაფსური გზით ნეირონის აღსაგზნებად შემწოვ ელექტროდებს მიეწოდება დაბვის იმპულსები. იმპულსების სერიაში თითოეული იმპულსის ხანგრძლივობა 50 მილიწამის ტოლია. მათი მიმდევრობის სიხშირე 1,0 ჰერცით განისაზღვრება. სტიმულაციას ვიწყებთ ყოველთვის მინიმალური მნიშვნელობიდან- 0,1 ვოლტიდან. ასეთი ამპლიტუდის სტიმული ზღურბლოვანია. შემდეგ ხდება ამპლიტუდის თანდათან მომატება, ვიდრე რეაქციებში არ გამოჩნდება ქმედების პოტენციალები.

სურათ 20-ზე მოცემულია ტიპური სურათი მარცხენა პარიეტალური განგლიის №3 იდენტიფიცირებადი ნეირონის რეაქციებისა მარცხენა პალიალურ განგლიაზე სტიმულის მიწოდების პირობებში (საკონტროლო ნეირონი). სტიმულის ამპლიტუდა ზღურბლს აღემატება და შეადგენს 0,5 V.



სურ 20. ოსცილოგრამაზე ვხედავთ ნეირონის რეაქციებს ქმედების იმპულსების გენერირების სახით ნერვზე მასტიმულირებელ დაბვის იმპულსების მოდების გამო.

დაბვის იმპულსების მიმდევრობა მოცემულია ოსცილოგრამის ქვეშ. ამ მასტიმულირებელ იმპულსთა ამპლიტუდა შეადგენს 0,5 ვოლტს. მიმდევრობის სიხშირე 1 ჰერცია. თითოეული მათგანის სიგანე 50 მილიწამის ტოლია. აშკარაა, რომ თავდაპირველად თითოეული მასტიმულირებელი იმპულსი იწვევს ნეირონის მიერ რამოდენიმე ქმედების პოტენციალის გენერირებას. მასტიმულირებელ იმპულსთა განმეორების კვალობაზე გენერირებულ იმპულსთა სიხშირე კლებულობს და

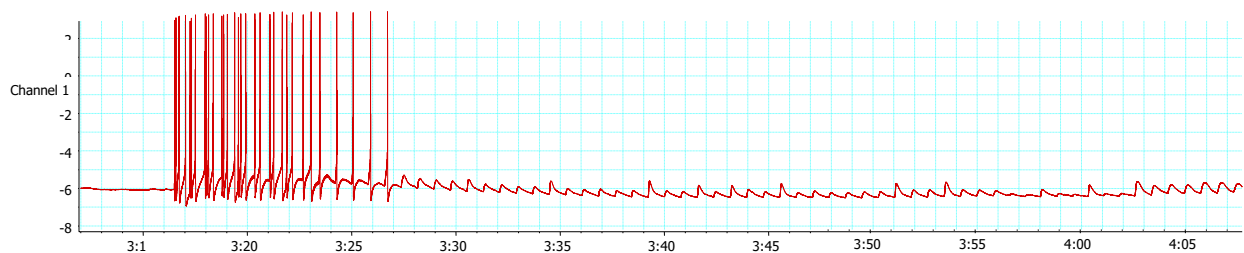
უტოლდება სტიმულის სიხშირე. პაბიტუაციის დაგდომის შემდეგ ნეირონი უპასუხოდ ტოვებს სტიმულს.

ამრიგად, როგორც ვხედავთ, სტიმულის მიწოდებაზე, რომელიც წარმოადგენს ძაბვის იმპულსების ერთობლიობას, ნეირონი პასუხობს ქმედების პოტენციალების ჯგუფით თითოეულ მასტიმულირებელ იპულსზე. ეს რეაქციები თანდათან სუსტდება და ბოლოს მყარდება სრული მიჩვევა, რაც იმაში გამოიხატება, რომ მთლიანად წყდება ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალებია გენერირება სტიმულზე რეაქციის სახით. პაბიტუაციის ეს მოვლენა შეიძლება განვიხილოთ როგორც ნეირონის მიერ ინფორმაციის გადამუშავება და შენახვა. მოცემული სტიმულის სერია ნეირონისათვის გახდა “ცნობადი”, მან დააგროვა ინფორმაცია და შეწყვიტა ამ სტიმულზე რეაგირება როგორც გადამუშავებულ ინფორმაციაზე. სრული პაბიტუაციის დაგდომის შემდეგ სტიმულაციას ვწყვეტთ. ამ შეწყვეტიდან 20-30 წუთის ინტერვალში სტიმულაციის ხელახალი მიწოდება ნეირონში არ აღძრავს რეაგირებას ამ სტიმულზე ქმედების პოტენციალებით, რაც იმის მომასწავებელია რომ ნეირონს “ახსოვს” მიწოდებული ინფორმაცია.

თუ სტიმულაციას გავიმეორებთ 30 წუთის შემდეგ ნეირონის რეაქციები ამ სტიმულზე ქმედების პოტენციალების გენერაციის სახით ისევ აღსდგება, ოღონდ რეაქციები ოდნავ შესუსტებულია პირვანდელ რეაქციებთან შედარებით. შემდგომი 30 წუთის დასვენება საშუალებას იძლევა სურათის აღსადგენად, ოღონდ რეაქცია კიდევ უფრო შესუსტებულია. თუ ასეთ სტიმულაციას გავიმეორებთ მრავალჯერ, ნეირონი აღარ რეაგირებს მოცემულ სტიმულზე და შეიძლება ითქვას, რომ ნეირონმა სრულად მოახდინა ინფორმაციის შენახვა. ამრიგად ნეირონი საშუალოდ ინფორმაციას ინახავს მოკლევადიანი მეხსიერების სახით 30 წუთამდე დროის ინტერვალში.

დასხივებულ ნეირონთა გამოკვლევა

სურ 21 ზე ვხედავთ ტიპურ სურათს დასხივებული ნეირონის (მარცხენა პარიეტალური განგლიიდან) სტიმულზე მიჩვევის დინამიკისა TEM Cell-ში დასხივების შემდეგ. შემავალი ტალღის სიმძლავრე ტოლია 0,125 ვატისა. ნეირონის მიერ შთნთქმული სიმძლავრე უდრის 0,72 ვატი/კგ. ნეირონის მგრძნობელობა დაუსხივებელ ნეირონთან შედარებით გაიზარდა და იგი რეაგირებს 0,5 V ამპლიტუდის სტიმულზე უფრო მეტად ვიდრე საკონტროლო ნეირონები. 30 წუთიანი ინტერვალით დასვენების შემდეგ სტიმულაციის სერიების განმეორებამ გამოიწვია ქმედების პოტენციალების რეაქციების აღდგენა, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ყოველი განმეორებული სერიის შემდეგ რეაქციათა ინტენსივობა კლებულობს და მიჩვევა სწრაფად ვითარდება.

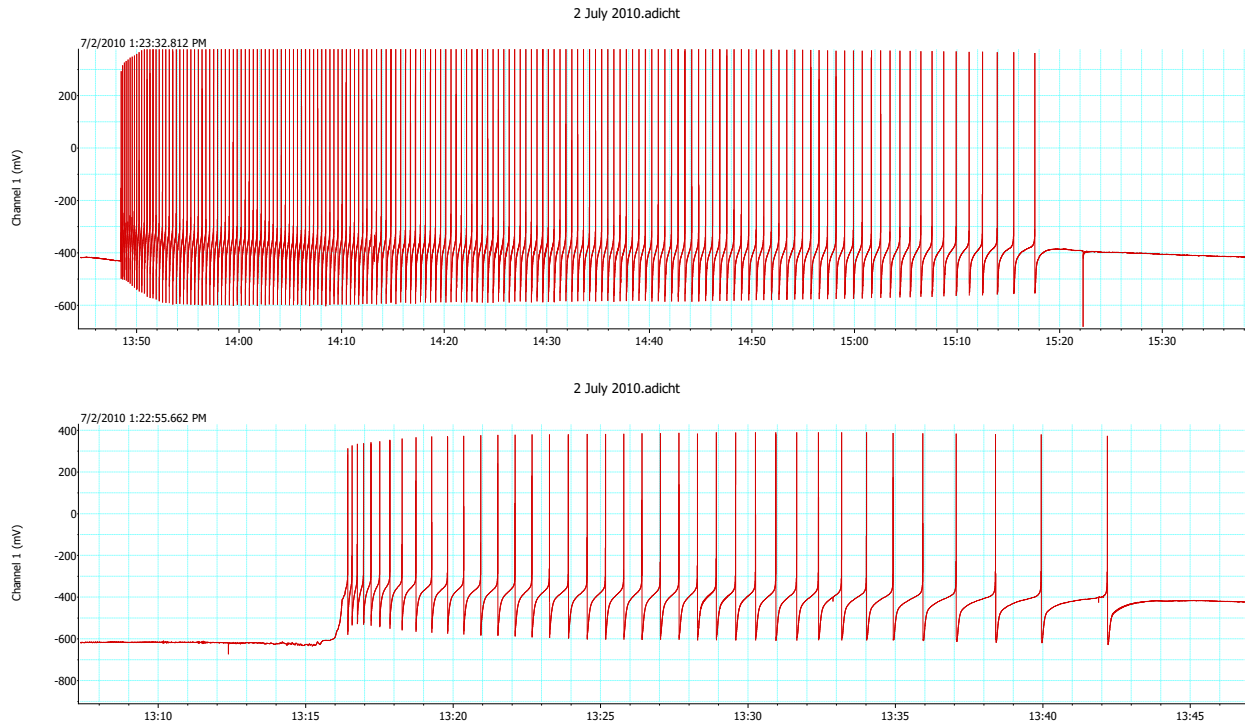




სურ. 21. პირველ ოსცილოგრამაზე ვხედავთ ნეირონის რეაქციებს ნერვის სტიმულაციაზე 0,4 V ამპლიტუდის მქონე სტიმულებით. სრული ჰაბიტუაციის დავდგომის შემდეგ ვხედავთ მხოლოდ აღმეზნებ პოსტსინაფსურ პოტენციალებს, რაც შეესება ქმედების პოტენციალებს ისინი სრულად დაითრგუნენ. მეორე ოსცილოგრამაზე ნახვენებია იგივე ნეირონის რეაქციები იმავე სტიმულზე დასვენებიდან 30 წუთის შემდეგ. ვხედავთ რომ რეაქციები აღსდგა ქმედების იმპულსთა სახით, ოღონდ უფრო ნაკლები ინტენსივობით. მესამე ოსცილოგრამაზე ვხედავთ ამავე ნეირონის რეაქციას მე-5 სტიმულაციის სერიაზე. ქმედების პოტენციალები სრულიად დათრგუნულია.

ნეირონების რეაქციების ხანგრძლივობა დამოკიდებულია შესავალ სიმძლავრეზე. ექსპერიმენტებმა ცხადვებს, რომ შესავალი სიმძლავრის 5 ვატამდე გაზრდამ გამოიწვია რეაქციების ხანგრძლივობის მნიშვნელოვანი ზრდა, და შესაბამისად გაიზარდა სრული ჰაბიტუაციისათვის საჭირო დროც. სერიების განმეორება 30 წუთიანი დასვენების შემდეგ აღადგენს რეაქციებს სტიმულზე. თუმცა, აღსანიშნავია, რომ ეს რეაქციები უფრო მეტი ინტენსივობისაა ვიდრე 0,125 ვატი სიმძლავრის მიმართ ექსპოზიციის დროს, და ცხადია საკონტროლო ნეირონების შემთხვევასთანაც.

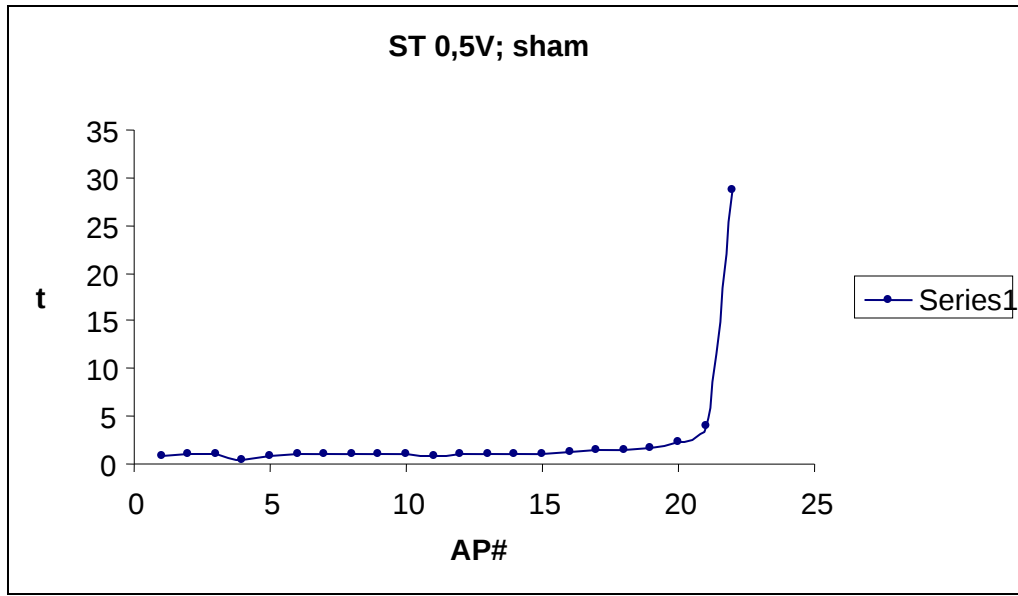
სურ. 22ზე მოცემულია 5 ვატის სიმძლავრის ელექტრომაგნიტურ ველში ნეირონის 60 წუთიანი ექსპოზიციის ტიპური შედეგი:



სურ 22. პირველ ოსცილოგრაფზე ნაჩვენებია LPG #3 იდენტიფიცირებული ნეირონის რეაქციები ქმედების პოტენციალების სახით მარცხენა პალაილურ ნერვზე 0,5 V ამპლიტუდის მქონე დაბვის იმპულსებით სტიმულაციის პირობებში. სრული პაბიუაცია დამყარდა 1 წუთსა და 31 წამში.

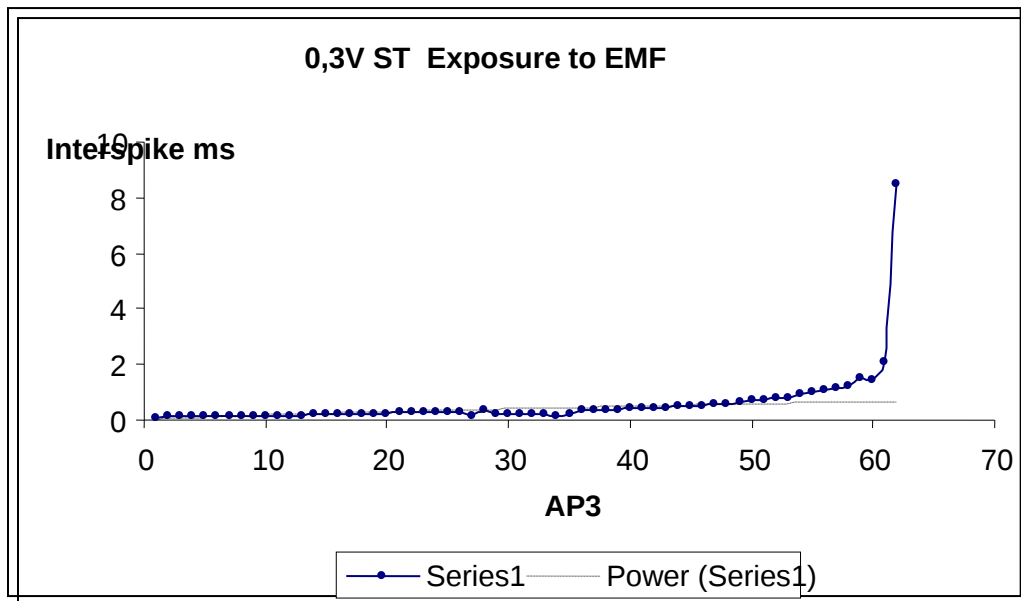
მეორე ოსცილოგრაფზე ნაჩვენებია ნეირონის რეაქციები იგივე სტიმულის მიმართ 30 წუთიანი დასვენების შემდეგ. სრული პაბიუაციის დამყარებას 27 წამი დასჭირდა.

პაბიუაციის რაოდენობრივად გამოსახვისათვის შევიმუშავეთ შემდეგი სახის ფუნქცია: აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია ქმედების პოტენციალის ნომერი რეაქციაში, ხოლო ორდინატა ღერძზე კი იმპულსთა შორის დროის ინტერვალი წამებში. მე-23 და მე-24 სურათებზე მოცემულია ეს ფუნქციები საკონტროლო და დასხივებულ ნეირონებისათვის. აშკარაა პაბიუაციისათვის საჭირო დროის გახანგრძლივება, გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რიცხვის ზრდა და იმპულსთაშორის ინტერვალის შემცირება.



სურ. 23 რეაქციის ფუნქცია საკონტროლო ნეირონისათვის. X ღერძზე გადაზომილია ქმედების იმპულსის ნომერი,

Y ღერძზე გადაზომილია იმპუსტაშორის დროის ინტერვალი მილიწამებში.



სურ. 24 რეაქციის ფუნქცია დასხივებული ნეირონისათვის. TEM Cell-ში ექსპოზიციის დრო 60 წუთია. შესავალი სიმძლავრე შეადგენს 5 ვატს. SAR=5,7 ვატ/კგ.

X ღერძზე გადაზომილია ქმედების იმპულსის ნომერი,

Y ღერძზე გადაზომილია იმპულსთაშორის დროის ინტერვალი მილიწამებში.

შედეგი 1800 მგჰც სიხშირის უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ტალღის ნეირონის სინაფსურ სტიმულაციაზე მიჩვევის პროცესზე გავლენაზე

მობილური ტელეფონის ელექტრომაგნიტურ ველში ნეირონის მოთავსება იწვევს ნეირონის აღზნებადობის გაზრდას, მცირდება სინაფსური სტიმულის მიერ გამოწვეული ქმედების პოტენციალთა შორის დროის ინტერვალი, ხანგრძლივდება ამავე სტიმულის მიმართ რეაქციის დრო და გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რაოდენობა. იცვლება ნეირონის ფუნქციური მახასიათებლები: სუსტდება ჰაბიტუაციის უნარი და ფართოვდება ინფორმაციის შენახვისათვის საჭირო დრო.

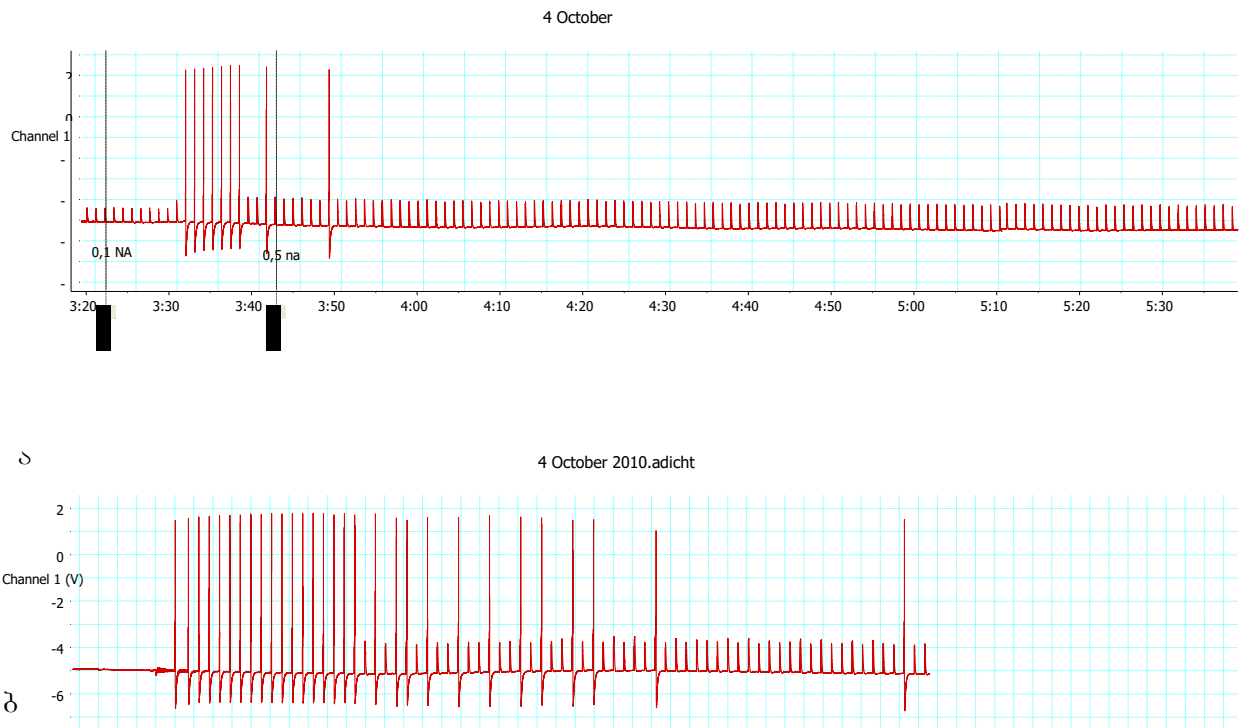
1-20 პერცი დაბალი სიხშირებით იმპულსურად მოდულირებული ელექტრომაგნიტური ველის (გადამტანი სიხშირე 1800 მეგაჰერცი) ნეირონის უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ მიჩვევის პროცესზე გავლენა.

თანამედროვე მობილურ კავშირგაბმულობაში ადგილი აქვს ძირითადი გადამტანი სიხშირის იმპულსურად ანუ მართკუთხა მოდულაციას. GSM სისტემაში გადამტანი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღა სხივდება 4,6 მილიწამის განმავლობაში. ე.ი. გვაქვს ამ ხანგრძლივობის მართკუთხა პაკეტები, რომლებიც შევსებულია გადამტანი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ტალღით. დროის ინტერვალი პაკეტის თითოეულ იმპულსს შორის არის 0,546 მილიწამი. ამ დროის განმავლობაში ველი არ სხივდება. ასეთი ორგანიზების შედეგად გვაქვს 217 პერცი დაბალი სიხშირე. ყოველი 120 მილიწამის გავლის შემდეგ პაკეტის მიმდინარეობა წყდება 8,7 მილიწამის განმავლობაში. ასეთი წყვეტა განაპირობებს 8,3 პერცი დაბალსიხშირული კომპონენტის შემოტანას საერთო სურათში. ამრიგად იკვეთება ორი ძირითადი დაბალსიხშირული კომპონენტი: 8,3 პერცი და 217 პერცი. ცხადია, ასევე გვაქვს მაღალსიხშირული კომპონენტი საშუალოდ 1800 მეგაჰერცი. როგორც უკანასკნელ ხანებში გამოქვეყნებული სამეცნიერო კვლევებიდან გამოირკვა, ნეირონი ახდენს ელექტრომაგნიტური ველის დემოდულაციას. აქედან გამომდინარეობს ის, რომ ნეირონზე ზემოქმედებს ელექტრომაგნიტური ველის როგორც მაღალსიხშირული ასევე დაბალსიხშირული კომპონენტები.

ყოველი ექსპერიმენტი მოიცავდა სხვადასხვა პრეპარატიდან ორი ნეირონის შესწავლას. ერთერთი მათგანი ექვემდებარებოდა TEM CELL-ში დასხივებას, ხოლო მეორე, გადიოდა ყველა იგივე პროცედურას, TEM CELL -ში 60 წუთის განმავლობაში მოთავსებით, ოღონდ ელექტრომაგნიტური ველის მოდების გარეშე (საკონტროლო ნეირონები). ამასთანავე უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ ყველა შემთხვევაში ნეირონის სტიმულაცია ხდებოდა ზღურბლზე ოდნავ მაღალი მნიშვნელობის მქონე სტიმულებით. თითოეული პრეპარატი გამოიყენებოდა მხოლოდ ერთხელ, პირველი სტიმულაციის პირობებში.

1 პერცი სიხშირით მოდულაციის შედეგები:

სურ. 25 -ზე პირველ სტრიქონის ოსცილოგრამაზე (ა) ვხედავთ საკონტროლო ნეირონის უჯრედშიგა სტიმულაზე მიხვევის სურათს. სტიმულაცია დაწყებულ იქნა 0,1 ნა ამპლიტუდის მქონე უჯრედშიგა იმპულსებით. როგორც გამოირკვა ასეთი იმპულსები ზღურბლსკვედა მნიშვნელობისა იყვნენ, რადგან ვერ გამოიწვიეს ქმედების პოტენციალებია აღმოცენება. ამის გამო მოხდა მასტიმულირებელ იმპულსთა ამპლიტუდის თანდათან გაზრდა, ვიდრე ნეირონმა არ უპასუხა ქმედების პოტენციალებით. ზღურბლსკვედა აღმოჩნდა 0,5 ნა ამპლიტუდის იმპულსები. ნეირონმა ასეთ სტიმულაციას უპასუხა 9 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დამყარდა სტიმულის მიმართ მიხვევა. მათ ნაცვლად ჩანაწერში ვხედავთ მცირე არტეფაქტებს დეპოლარიზაციული “კბილანების” სახით. ამავე სურათზე მეორე სტრიქონის ოსცილოგრამა (ბ) გვიჩვენებს დასხივებული ნეირონის იგივე ამპლიტუდის მქონე (0,5 ნა) სტიმულზე მიხვევის დინამიკას.



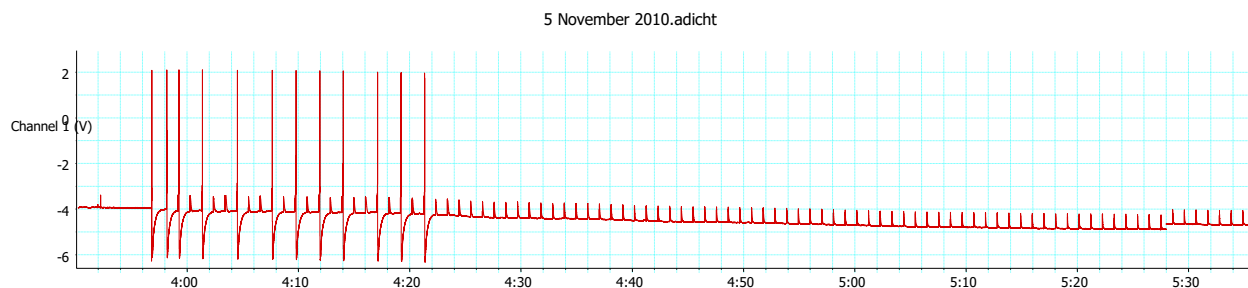
სურ. 25.

- ა- საკონტროლო ნეირონი
- ბ- დასხივებული ნეირონი. ელექტრომაგნიტური ველის სიხშირე 1800 მეგაჰერცია. მოდულაციის სიხშირე შეადგენს 1 ჰერცს .

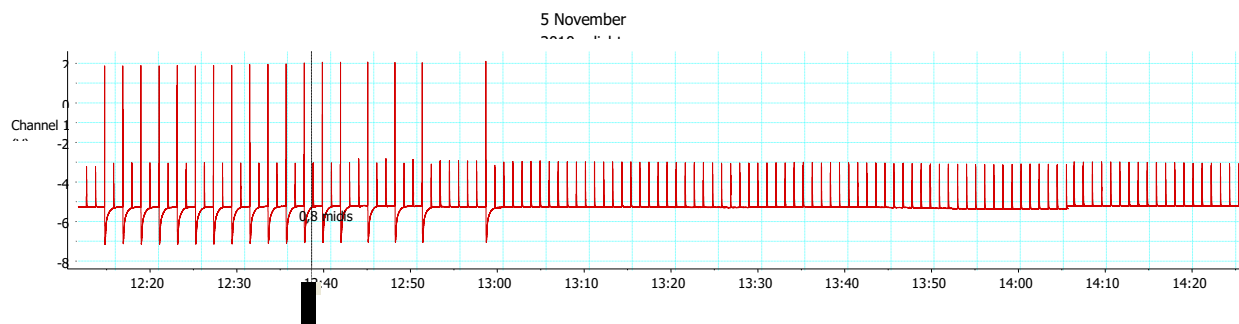
ნეირონმა უპასუხა 29 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დამყარდა სრული პაბიტუაცია (მიხვევა). ამრიგად თუ საკონტროლო ნეირონს მიხვევისათვის დაჭირდა 20 წამი, დასხივებულ ნეირონის შემთხვევაში ეს დრო გაიზარდა 80 წამამდე. აშკარაა, რომ ელექტრომაგნიტურ ველში მოთავსებამ გამოიწვია ნეირონის რეაქციების დროის გაზრდა, ანუ მიხვევისათვის საჭირო დროის გაზრდა.

2 ჰერცით მოდულრებული 1800 მეგაჰერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედებით ნეირონის სტიმულზე მიხვევის დინამიკა ნაჩვენებია სურათ 26-ზე. ამ სურათზე პირველი სტრიქონი (ა) ისევ გვიჩვენებს საკონტროლო ნეირონის მიხვევის

დინამიკას. ვხედავთ, რომ ნეირონმა სტიმულს უპასუხა 12 ქმედების პოტენციალით და შემდეგ დადგა სრული პაზიტივაცია. გაზომვა გვიჩვენებს, რომ მიჩვევისათვის ნეირონს დაჭირდა 22 წამი. ეს დაახლოებით იგივეა რას წინა შემთხვევაში იყო საკონტროლო ნეირონისათვის.



ა



ბ

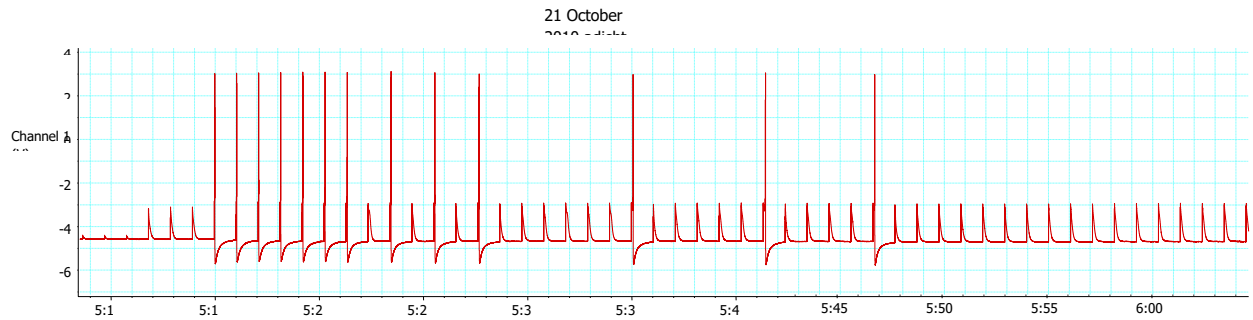
სურ. 26

ა-საკონტროლო ნეირონის მიჩვევა სტიმულზე- 0,8 ნა.

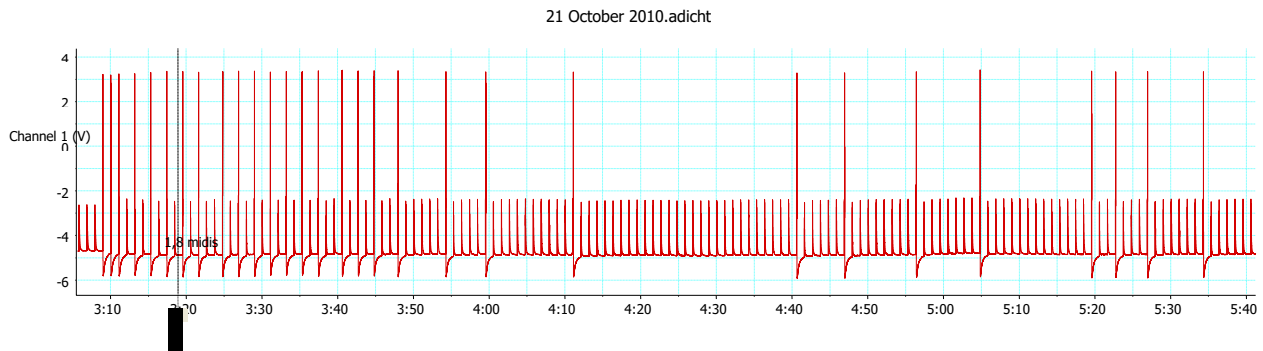
ბ- 2 პერცი სიხშირით მოდულირებული ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის სტიმულისმიმართ მიჩვევაზე.

როგორც 1 პერცი სიხშირით მოდულაციისას, აქაც გამოიკვეთა დასხივების შედეგად ნეირონის პასუხების ზრდა და მიჩვევისათვის საჭირო დროის გაფართოვება.

სურათ 27-ზე ნაჩვენებია ნეირონების მიჩვევის დინამიკა. აქაც, პირველ სტრიქონზე ილუსტრირებულია საკონტროლო ნეირონის რეაქციები უჯრედშიგა სტიმულაციაზე, ხოლო მეორე სტრიქონზე კი ნაჩვენებია 3 პერცი სიხშირით მოდულირებულ ელექტრომაგნიტურ ველში ექპოზირებული ნეირონის იგივე სტიმულის მიმართ მიჩვევის დინამიკა. საკონტროლო ნეირონმა (ა) სტიმულს უპასუხა 13 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დადგა სრული მიჩვევა. რაც შეეხება დასხივებულ ნეირონს (ბ), აქ 22 ქმედების პოტენციალის გენერირების შემდეგ თითქოს ჩამოყალიბდა მიჩვევა, მაგრამ 30 წამის დროითი ინტერვალის შემდეგ ნეირონმა ისევ გააგრძელა პერიოდულად ქმედების პოტენციალების გენერირება, რაც მიჩვევის დარღვევად შეიძლება განვიხილოთ.



ა



ბ

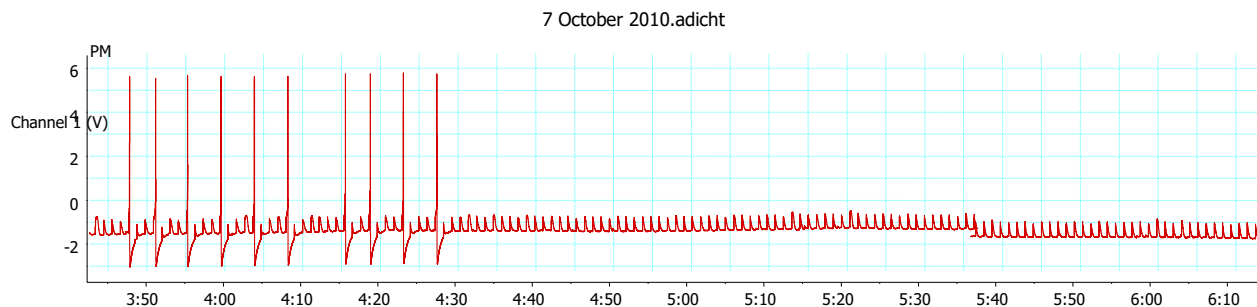
სურ. 27

ა – საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა 1,2 ნა ამპლიტუდის მქონე სტიმულებზე (უჯრედშიგა დენის იმპულსები).

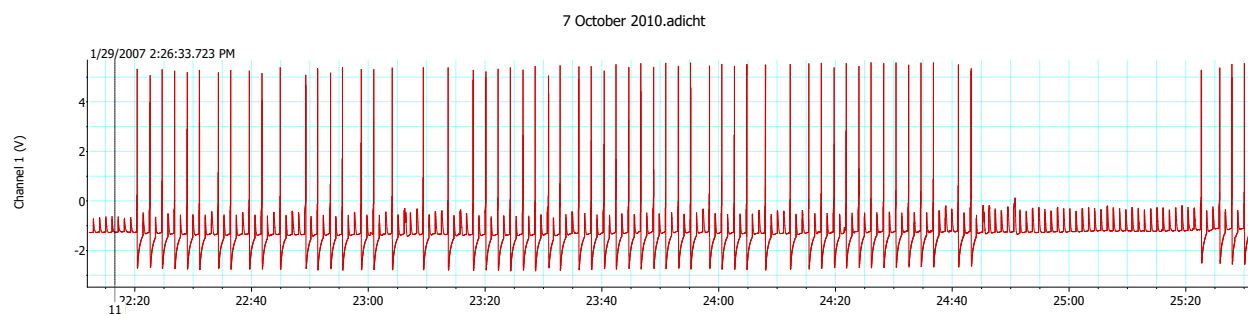
ბ- ნეირონი დასხივდა 3 პერცი მოდულაციის სიხშირის 1800 მეგაჰერცი ელექტრომაგნიტური ველით. მიჩვევა დარღვეულია.

28-ე სურათზე ილუსტრირებულია 1800 მეგაჰერცი ველის 4 პერცი სიხშირით მოდულაციის პირობები. ნეირონი დასხივებულ იქნა ასეთი ველით. საკონტროლო ნეირონი (ა) სტიმულს მიეწვია 10 ქმედების პოტენციალის გენერირების შემდეგ. თუმცა იმასაც უნდა გაეხსენებინათ, რომ ნეირონი თავიდანვე მიდრეკილი იყო სტიმულების ნაწილის “ამოგდებისაკენ”, გამომდინარე აქედან სრული მიჩვევისათვის დრო ოდნავ გაზრდილია.

ამ შემთხვევაშიც გამოიკვეთა წინა შემთხვევის მსგავსი სურათი ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ ექსპოზიციის პირობებში. რაღაც დროის შემდეგ თითქოს ყალიბდება პაბიტუაცია, მაგრამ შემდეგ ნეირონი ისევ აგრძელებს სტიმულებზე ქმედების პოტენციალებით პასუხს (ბ).



ა

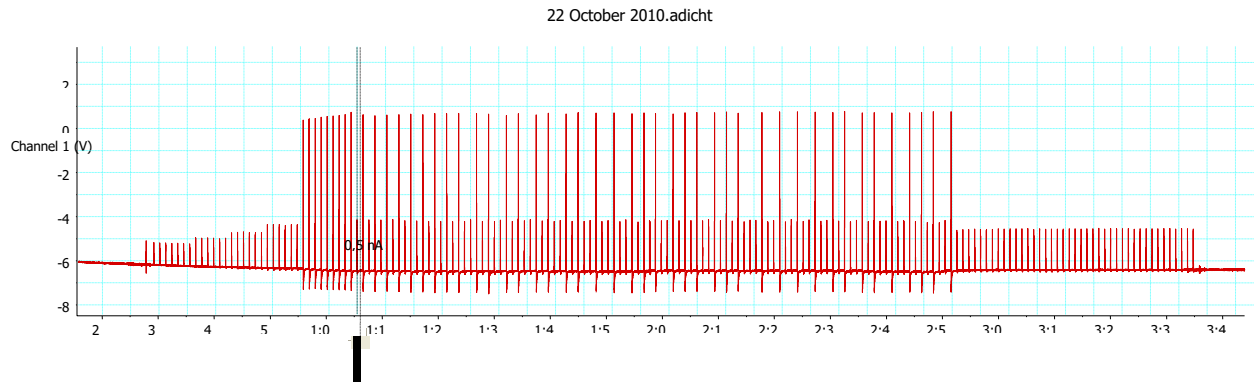


ბ

სურ. 28

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიხვევა სტიმულზე. სტიმულის ამპლიტუდა 0,5 ნა-ს შეადგენს.
- ბ- დასხივებული ნეირონის სტიმულზე რეაქციები.

მოდულაციის სიხშირის შემდგომმა ზრდამ და სათანადოდ ნეირონის ექსპოზიციამ შესაბამის ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ აღწერილის მსგავს ეფექტები გამოიწვია. იმის გამო, რომ საკონტროლო ნეირონების სტიმულის მიმართ რეაქციები და სათანადოდ მიხვევის დინამიკა და მიხვევის დადგომისათვის საჭირო დროები საშუალოდ ემთხვევა ერთმანეთს, შემდგომ სურათებზე მოტანილ იქნება მხოლოდ დასხივებულ ნეირონების სტიმულის მიმართ რეაქციები. 29- სურათზე ნაჩვენებია ერთერთი იმ ნეირონის მიხვევის დინამიკა, რომელიც დასხივებულ იქნა 5 ჰერცი სიხშირით მოდულირებულ ელექტრომაგნიტური ველით (გადამტანი სიხშირე 1800 მეგაჰერცია).

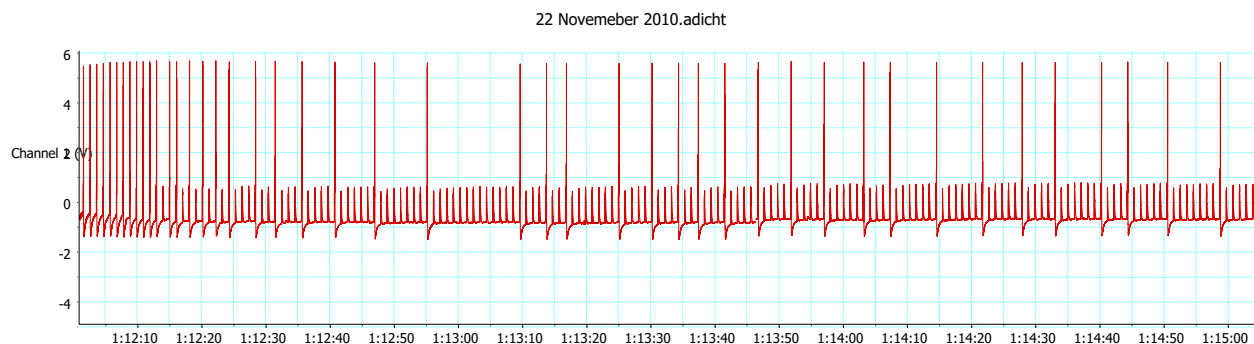


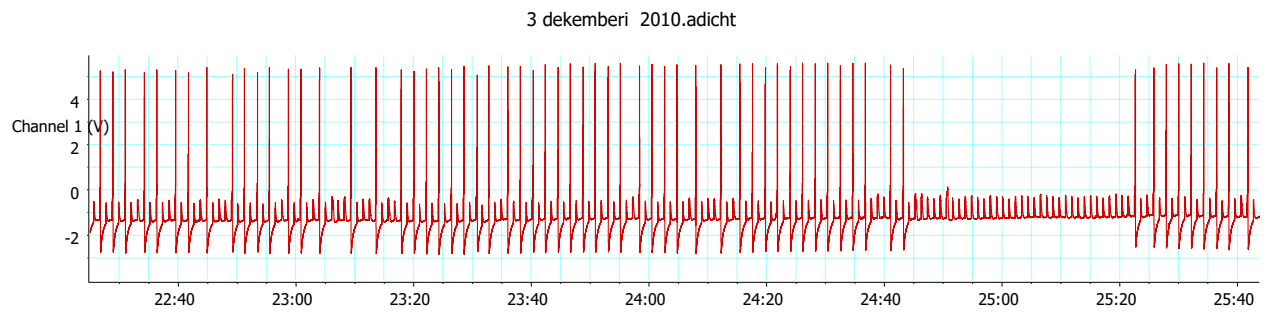
სურ 29. ნეირონის მიჩვევის დინამიკა 0,5 ნა ამპლიტუდის მქონე უჯრედშიგა დენის იმპულსების მიმართ. ნეირონი წინასწარ დასხივებულ იქნა 1800 მგჰც სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველით 5 პერცით მოდულაციის პირობებში.

თავდაპირველი სტიმულის ამპლიტუდა 0,1 ნა-ს ტოლია, რაზეც ქმედების პოტენციალები არ აღმოცენდნენ. ვხედავთ ამ აპლიტუდის ეტაპობრივ ზრდას, და ნეირონის რეაქციებს 0,5 ნა ამპლიტუდის სტიმულის მიმართ. ნეირონის პასუხები გამოიხატა 50 ქმედების პოტენციალის აღმოცენებაში. თავდაპირველად ნეირონმა ზედიზედ უპასუხა 10 სტიმულს. შემდეგ თითო სტიმულის გამოტოვება დაიწყო. შემდეგ ტოვებდა 2-3 იმპულსს. ბოლოს დამყარდა სრული მიჩვევა. სრული მიჩვევის დრომ შეადგინა 1 წუთი და 56 წამი. 5 პერცით მოდულაციის პირობებშიც აშკარაა მიჩვევისათვის საჭირო დროის ზრდა კონტროლთან შედარებით.

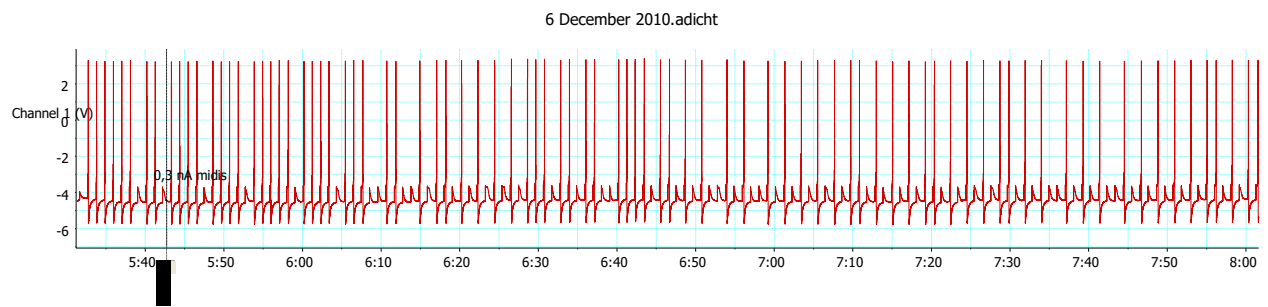
აღსანიშნავია რომ 6-10 პერცი სიხშირით მოდულირებულ ელექტრომაგნიტური ველების ნეირონის სტიმულზე რეაქციებისა და შესაბამისად სტიმულის მიმართ მიჩვევის დინამიკებს შორის მნიშვნელოვანი განსხვავება არ აღინიშნებოდა.

სურათ 30-ზე ნაჩვენებია 6-11 პერცით მოდულირებულ ველების მიმართ ექსპოზირებულ ნეირონთა სტიმულზე რეაქციები და მიჩვევის დინამიკები.

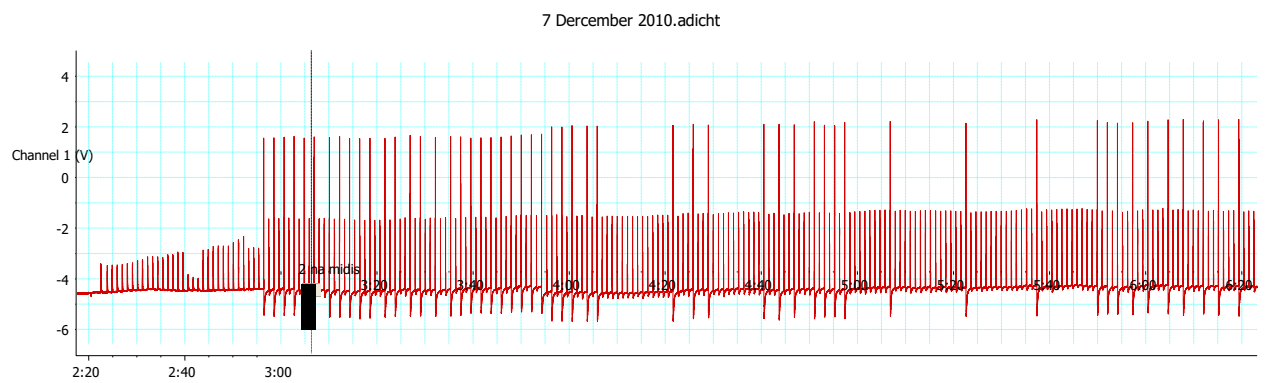




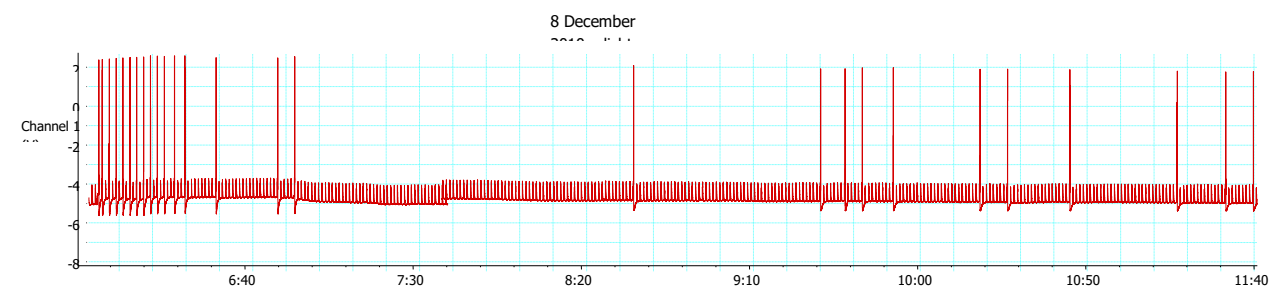
3



3



3



3

სურ 30.

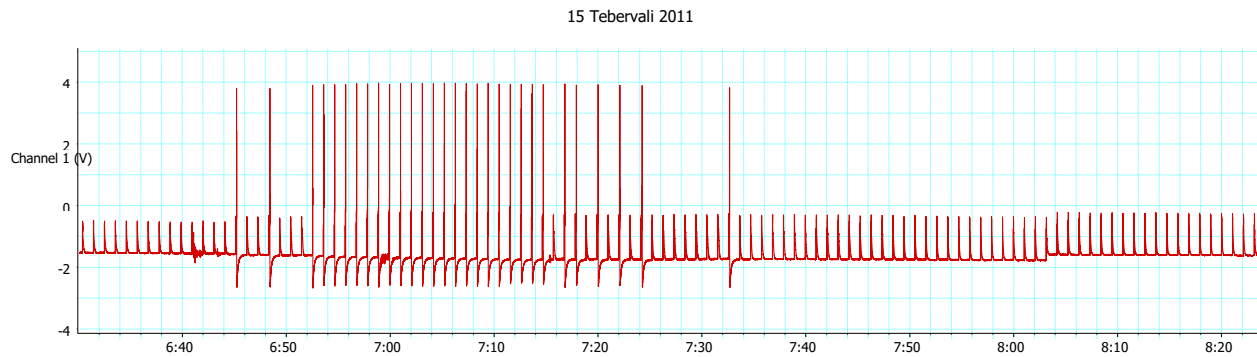
ა მოდულაციის სიხშირე 6 პერცია

ბ მოდულაციის სიხშირე 7 პერცია

გ მოდულაციის სიხშირე 8 პერცია

დ- მოდულაციის სიხშირე 9 პერცია

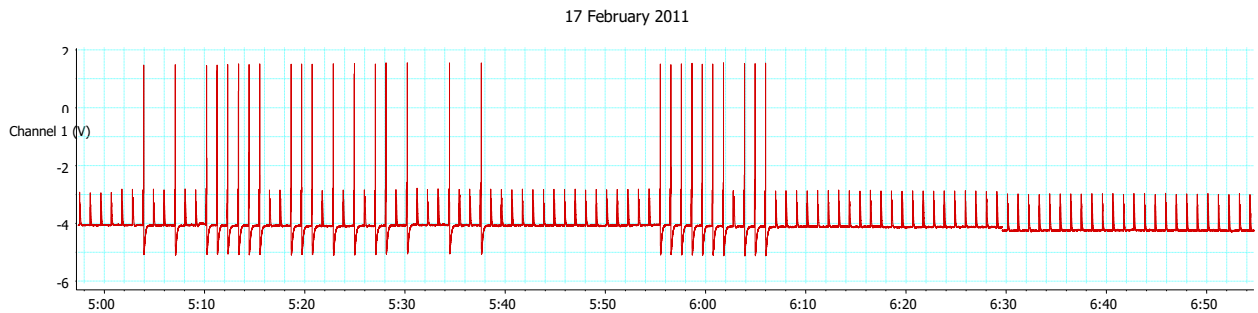
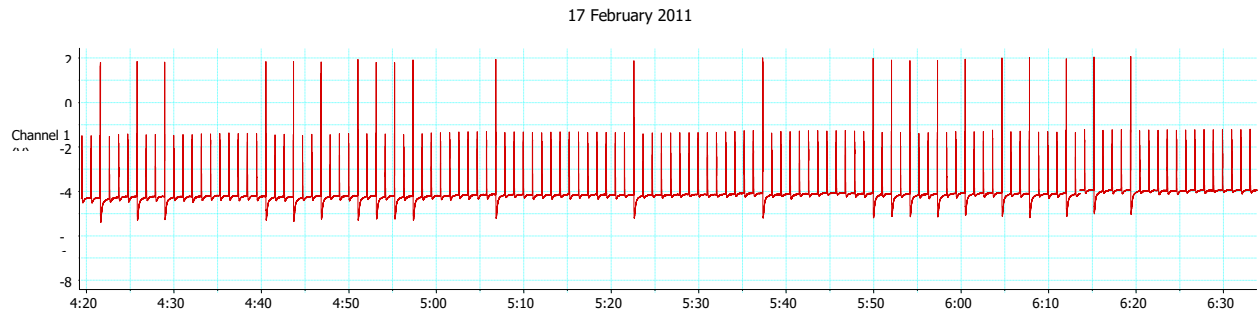
ე- მოდულაციის სიხშირე 10 პერცია.



სურათი 31. 11 პერციით მოდულირება

ვხედავთ 11 პერციით მოდულირებული ემვ დასხივებული ნეირონის რეაქციებს სტიმულზე. მასტიმულირებელი იმპულსების ამპლიტუდა შეადგენს 1 ნა.

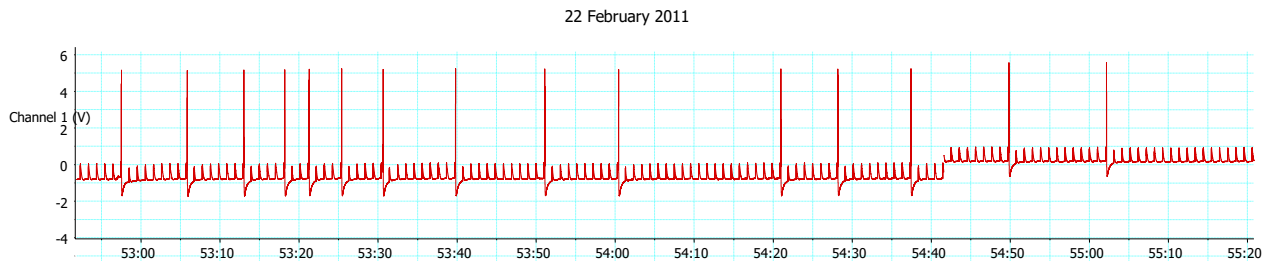
საკონტროლო ნეირონის შემთხვევაში ნეირონმა სტუმულს უპასუხა 11 ქმედების პოტენციალის გენერირებით, რის შემდეგაც ჩამოყალიბდა პაბიტუაცია. ემვ-ს ზემოქმედების შედეგად ნეირონმა მოახდინა 30 ქმედების პოტენციალის გენერირება, თუმცა პაბიტუაცია მაინც ჩამოყალიბდა. საკონტროლო შემთხვევაში პაბიტუაციის დადგომას დაჭირდა 45 წამი. დასხივებულ ნეირონის შემთხვევაში პაბიტუაციისათვის საჭირო დრო ოდნავ მეტი იყო, ასევე შეინიშნება განსხვავება - ნეირონმა სტიმულს უპასუხა 30 ქმედების პოტენციალით, რაც თითქმის 3 ჯერ მეტია ვიდრე საკონტროლო შემთხვევაში.

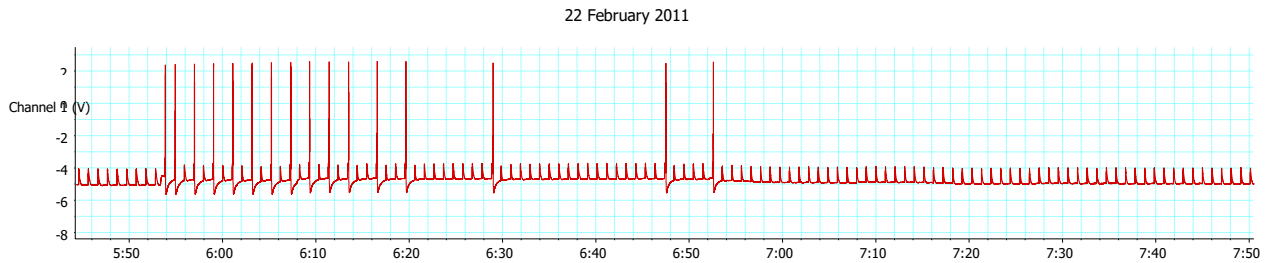


სურათი 32.

ამ სურათზე ნაჩვენებია საკონტროლო ნეირონისა და 12 პერცი სიხშირით მოღუღირებულ ემე-თი დასხივებული ნეირონის რეაქციები უჯრედშიგა იმპულსებით სტიმულაციაზე. საკონტროლო ნეირონს ჰაბიტუაციისათვის დაჭირდა 110 წამი, სტიმულზე რეაქციის სახით მოახდინა 20 ქმედების პოტენციალის გენერირება.

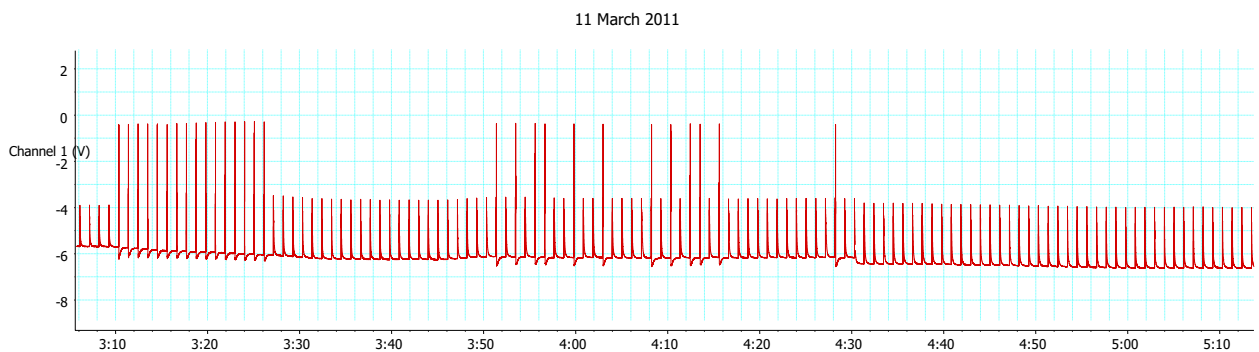
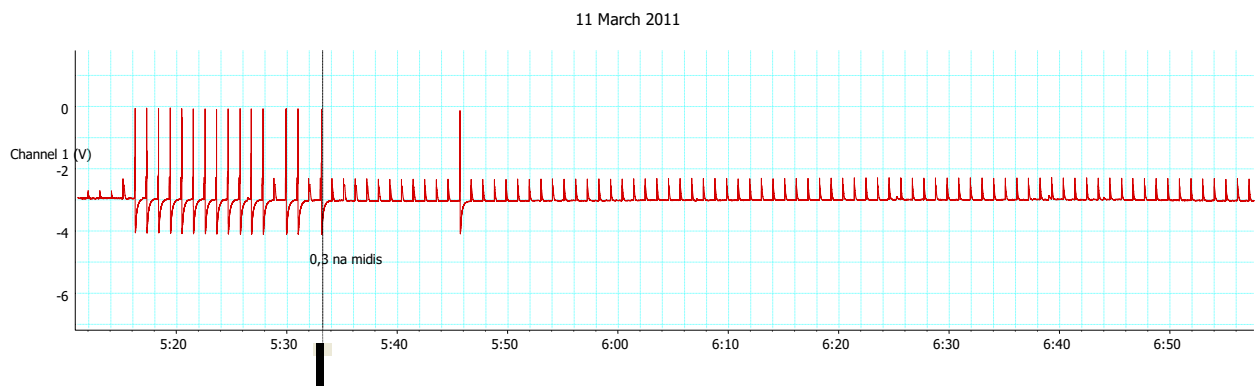
დასხივებულმა ნეირონმა სტიმულზე რეაქციის სახით მოახდინა 28 ქმედების პოტენციალის გენერირება. სრულ ჰაბიტუაციას დაჭირდა 167 წამი.





სურ. 33

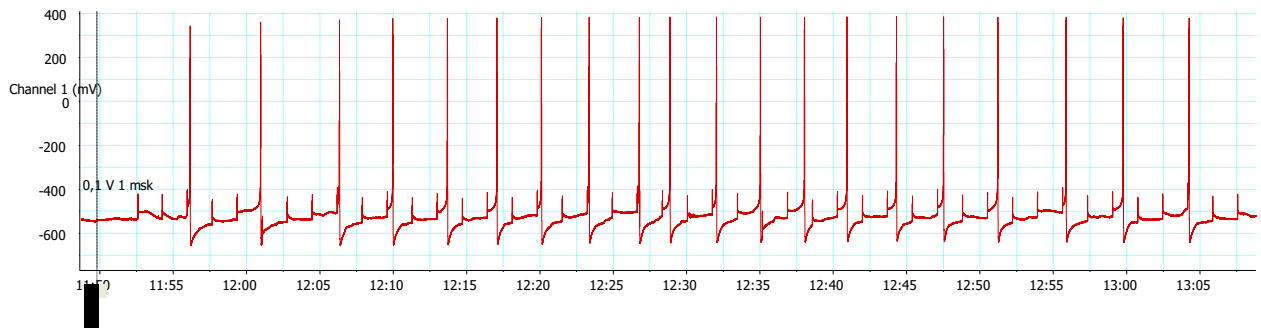
სურათი 33 ზე ნაჩვენებია 13 პერცი სიხშირით მოდულირებული ემვ-ს ევექტი ნეირონის პაბიტუაციაზე. პირველ სტრიქონზე ილუსტრირებულია საკონტროლო ნეირონის ხოლო მეორე სტრიქონზე დასხივებული ნეირონის მიხვევის დინამიკები ერთიადიგივე სტიმულით უჯრედსშიგა სტიმულაციაზე. სტიმულის ამპლიტუდა შეადგენს 2 ნანოამპერს. საკონტროლო ნეირონმა მოახდინა 12 ქმედების პოტენციალის გენერირება. პაბიტუაციის დრო შეადგენს 100 წამს, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ქმედების პოტენციალთა აღმოცენება ხდებოდა 2-10 სტიმულის გამოტოვებით. დასხივებულმა ნეირონმა მოახდინა 16 ქმედების პოტენციალის გენერირება, პაბიტუაცია კი 65 წამი დასჭირდა, მაგრამ უნდა აღინიშნოს ის გარემოება, რომ ამ შემთხვევაში ქმედების პოტენციალების გენერირების სიმკვრივე მეტი იყო (ხდებოდა მათი აღმოცენება თითო თითო სტიმულის გამოტოვებით).



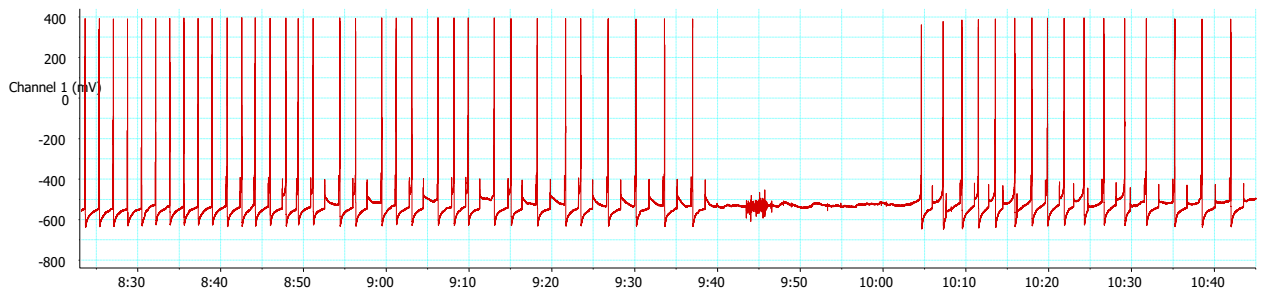
სურ. 34.

მე-34 სურათზე საილუსტრაციოდ მოტანილია 14 პერცი სიხშირის მოდულირების ეფექტები. პირველ სტრიქონზე არის საკონტროლო ნეირონის სტიმულზე მიხვევის დინამიკა. მეორე სტრიქონი დათმობილი აქვს 14 პერცი სიხშირით მოდულირებული ემგ-ს მიმართ ექსპოზირებულ ნეირონის სტიმულაცაზე რეაქციებს. საკონტროლო ნეირონის შემთხვევაში აღვნიშნავთ 16 ქმედების პოტენციალის გენერირებას. შეიძლება ითქვას, რომ რეაქციები “კლასიკური” სტილით მიმდინარეობდა. თავდაპირველად ნეირონი რეაგირებს ქმედების პოტენციალით უკლებლივ ყველა სტიმულზე, რის შემდეგაც იწყება ე.წ. “ამოგდებები”, რაც იმაში გამოიხატება, რომ ნეირონი უპასუხოდ ტოვებს ზოგიერთ სტიმულს. სრულ ჰაბიტუაციას დაჭირდა 30 წამი, მაგარამ აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ ამ შემთხვევაში სტიმულაციის ზღურბლი დაბალი იყო და ქმედების პოტენციალების აღმოცენება დაიწყო 0,3 ნა ამპლიტუდის უჯრედშიგა იმპულსებით სტიმულაციაზე. დასხივებულმა ნეირონმა ჯერ თითქოს გაიმეორა საკონტროლოს რეაქციები და უპასუხა 16 ქმედების პოტენციალით, თუმცა ცოტა ხანში რეაქციები აღსდგა და სრულ ჰაბიტუაციამდე კიდევ 12 ქმედების პოტენციალი გამოიმუშავა.

17 March 2011

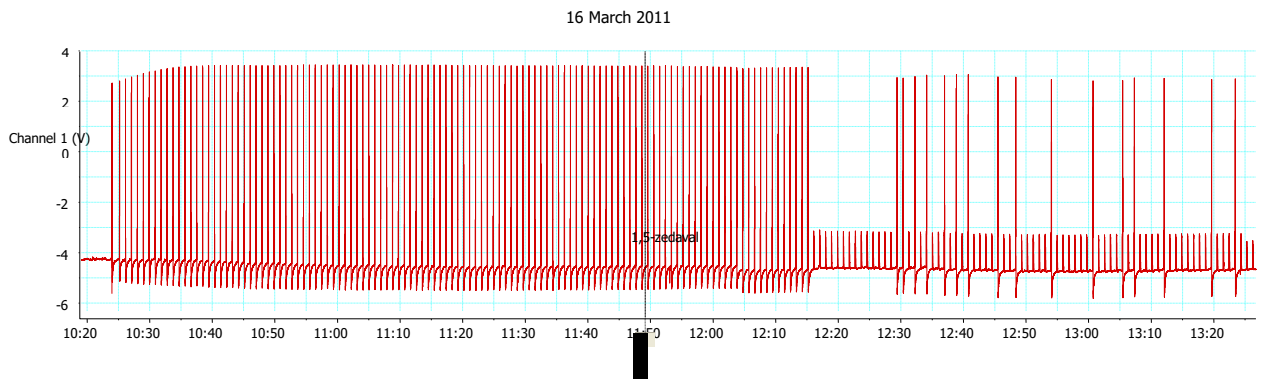
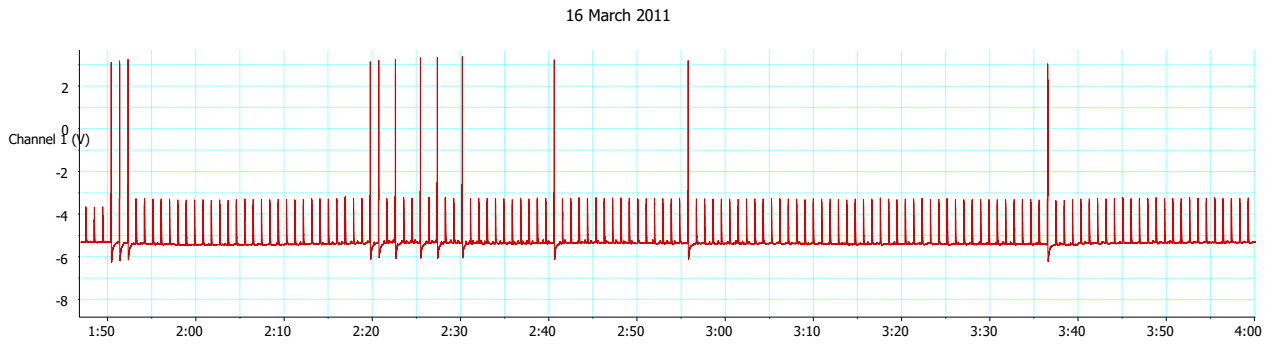


17 March 2011



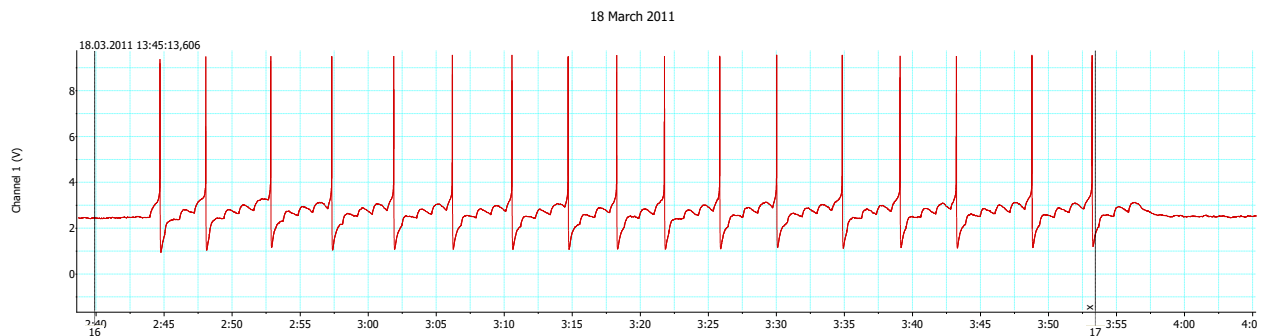
სურათი 35.

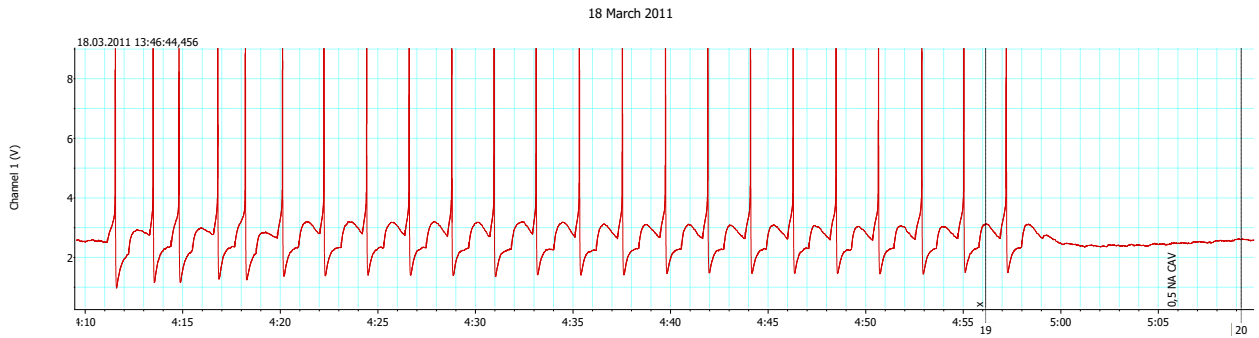
აქ ნაჩვენებია 15 პერცი სიხშირის მოდულირებული ემგ-ს ეფექტები ნეირონის მიხვევაზე: საკონტროლო ნეირონის სტიმულზე რეაქციის მიხვევა სწრაფად დამყარდა. 15 პერცი სიხშირით მოდულირებული ემგ-ს ზემოქმედების შედეგად ჰაბიტუაციას დაჭირდა მეტი დრო- მეორე სტრიქონი.



სურათი 36.

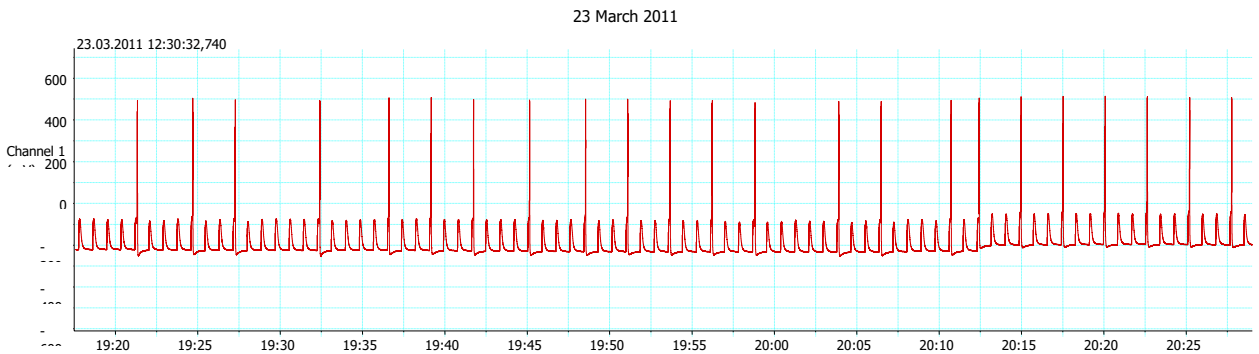
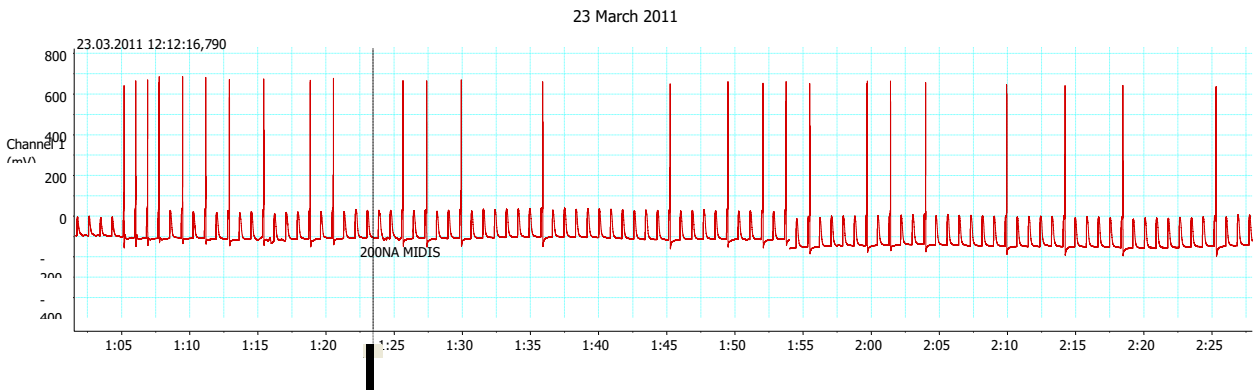
სურათ 36 ზე ვხედათ 16 პერცი სიხშირით ემგ-ს მოდულაციის ეფექტებს. საკონტროლო ნეირონმა (პირველი სტრიქონი გამოიმუშავა 12 ქმედების პოტენციალი, ხოლო სრული ჰაბიტუაციისათვის საჭირო დრომ 70 წამი შეადგინა. ექსპოზიცირებული ნეირონი 50 წამის განმავლობაში რეაგირებდა პრინციპით ერთი ქმედების პოტენციალი ერთ სტიმულზე, თუმცა შემდეგ დაიწყო “ამოგდებები”, თუმცა ჰაბიტუაცია არ დამყარდა 30 წუთის განმავლობაში.





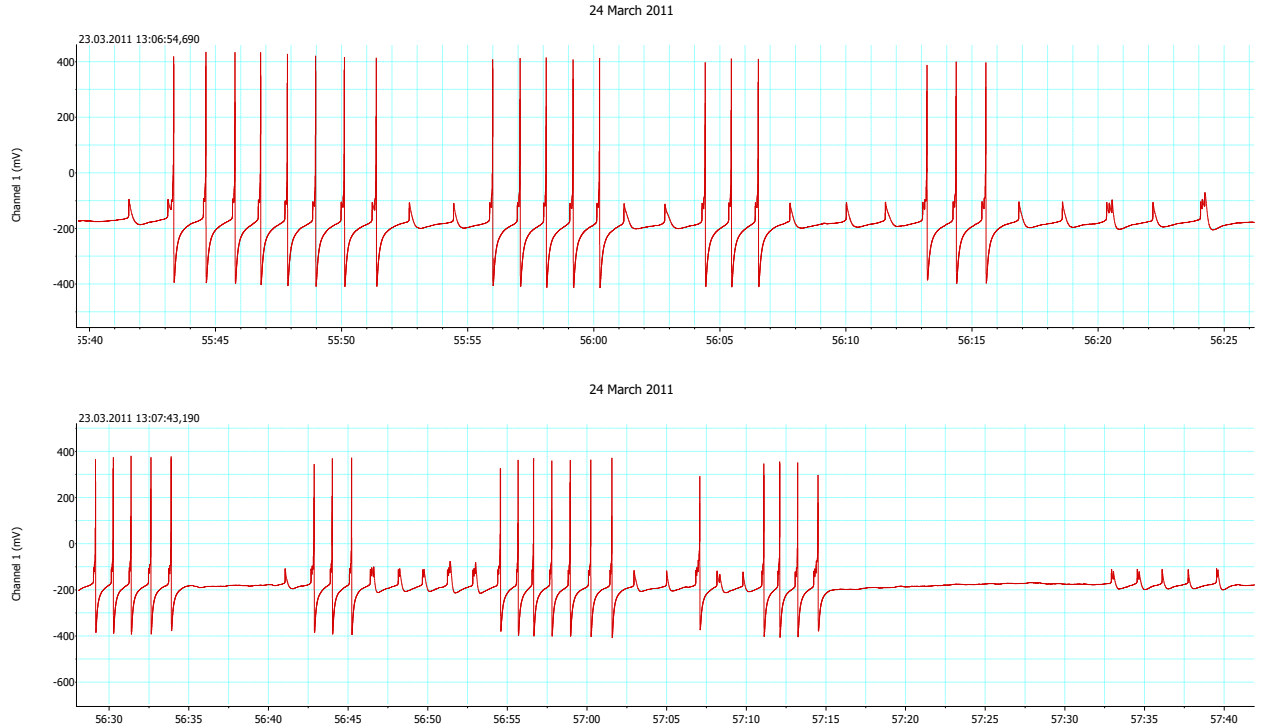
სურ. 37 17 პერცი სიხშირით მოდულაციის ეფექტი.

17 პერცი- დასხივებული ნეირონი უფრო მეტად ექვემდებარება სტიმულის ზემოქმედებას ვიდრე საკონტროლო ნეირონი. საკონტროლო ნეირონის შემთხვევაში ვხედავთ, რომ ნეირონი „ამოაგდებდა“ ყოველ 3 სტიმულს და პასუხობდა მე-4-ებს – ზედა სტრიქონი. დასხივებული ნეირონი „აგდებს“ მხოლოდ თითო სტიმულს და პასუხობს ყოველ მეორე სტიმულს. ქვედა სტრიქონი.



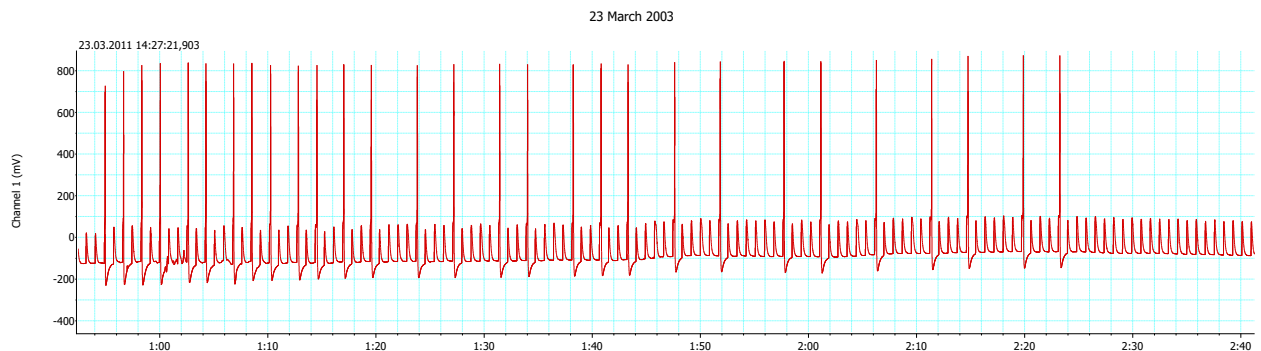
სურ. 38

18 პერცი სისშირით მოდულირებული ემგ-ს ზემოქმედება (სურ. 38): –დასხივებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა მეტია დაუსხივებელი ნეირონის მიხვევის დინამიკისაგან. ზედა სტრიქონი შეესაბამება საკონტროლო ნეირონს. ქვედა სტრიქონი შეესაბამება ექსპოზირებულ ნეირონს. ემგ-ს მოდულაციის სისშირე 18 პერცია. უჯრედშიგა იმპულსების ამპლიტუდა შეადგენს 1,2 ნანოამპერს.



სურ. 39

ამ სურათზე ილუსტრირებულია საკონტროლო და 19 პერციტით მოდულაციის შემთხვევაში დასხივებულ ნეირონთა მიხვევის დინამიკა. (იხ. ზედა და ქვედა სტრიქონები).





სურ. 40

მე-40 სურათზე ილუსტრირებულია საკონტროლო ნეირონის რეაქციები- ზედა სტრიქონი და 20 პერცით მოდულირებულ ველს ექსპოზირებული ნეირონის მიჩვევის (ქვედა სტრიქონი) დინამიკები. დასხივება აქაც ზრდის ნეირონის აღზნებადობას. საკონტროლო ნეირონმა პირველივე სტიმულიდან დაიწყო ამოგდებები, მაშინ როცა დასხივებული ნეირონი რეაქციები თავდაპირველად 10 სტიმულა რეაგირებს უწყვეტად და მხილოდ ამის შემდეგ დაიწყო ამოგდებების სერია.

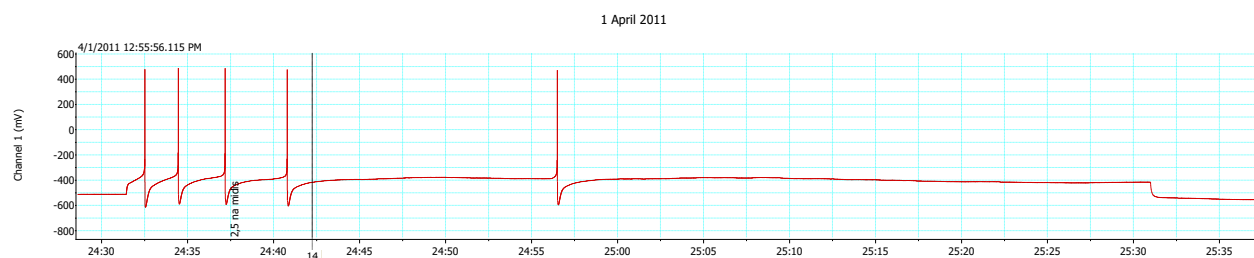
შედეგი: 1-20 პერცი სიხშირით მოდულირებული ემგ-ს ზემოქმედების ეფექტები ჰაბიტუაციის დინამიკაზე ურთიერთ იდენტურია. კერძოდ: საკონტროლო ნეირონის რეაქციები შედგება სტიმულზე ქმედების პოტენციალების გენერირებისაგან და ასევე “ამოგდებებისაგან”. დასხივების შედეგად ნეირონის პასუხები გახანგრძლივებულია. შესუსტებულია ჰაბიტუაციის უნარი.

სინაფსური ჰაბიტუაცია

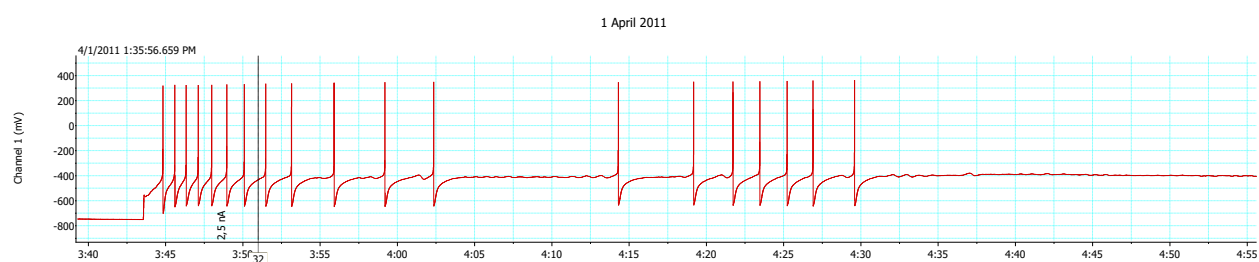
სინაფსური კავშირი განაპირობებს ნეირონის აღგზნებას ან შეკავებას იმისდა მიხედვით თუ რა მიეწოდება ნეირონს: აღგზნები პოსტსინაფსური პოტენციალები თუ შემკავებელი პოსტსინაფსური პოტენციალები. მიჩვევის დაკვირვება გაცილებით ეფექტურია ნეირონის აღგზნების პირობებში რადგან აღგზნებას თან ახლავს ქმედების პოტენციალების (იმპულსების) გენერირება. მიჩვევა აისახება ნეირონის მიერ გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რაოდენობის შემცირებასა და საბოლოოდ ამ გენერირების შეწყვეტაში. ამის გამო ჩვენ შევისწავლიდით ნეირონის სინაფსურ აღგზნებას და მიჩვევის დინამიკას. ჩვეულებრივ სინაფსური სტიმულაციისათვის გამოიყენება ნერვის სტიმულირება ძაბვის იმპულსებით. ეს ახდენს ნერვის აღგზნებას, რაც გადაეცემა ინტერნეირონებს და აღაგზნებს რა მათ, იწვევს საკვლევი ნეირონის სინაფსურ გაღიზიანებას. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ მნიშვნელობა აქვს თუ რომელ ადგილზე ხდება ნერვის გაღიზიანება. რაც უფრო ახლოსაა მასტიმულირებელი ელექტროდები განგლიასთან მით მეტია გაღიზიანების ეფექტი. ამ ხელისშემშლელი ფაქტორის თავიდან ასაცილებლად საჭიროა, რომ მასტიმულირებელი დენის იმპულსები ნერვზე მოდებულ იქნას ყოველთვის ერთიდაიგივე ადგილას.

თითოეული ექსპერიმენტი მოიცავს ნეირონების გამოკვლევას წყვილი იდენტიური განგლიდან- რომელთაგან ერთერთი არის საკონტროლო, ხოლო მეორე ექვემდებარება ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედებას. ასეთი მიდგომის არსი შემდეგში მდგომარეობს: საკვლევი ცხოველები ცივისსხლიანებია. ამიტომ ისინი დამოკიდებული არიან გარემოზე, ამინდზე, ტენიანობასა და სხვა ფაქტორებზე. ერთიდა იგივე საექსპერიმენტო დღეს როგორც საკონტროლო ისევე საკვლევი ცხოველი ერთიდაიგივე პირობებში იმყოფებიან და ამდენად ნეირონების რეაქციებში განსხვავება ან არგანსხვავება იქნება ელექტრომაგნიტური ველის შედეგი და არა გარემო პირობების ცვალებადობის შედეგი.

სურათ 41 ა-ზე ნაჩვენებია ერთერთი საკონტროლო ნეირონის (იდენტიფიცირებული ნეირონი LPGN#3) რეაქცია ნერვის სტიმულაციაზე იმპულსით. მასტიმულირებელ ნეირონის სინაფსურად აღზნებისათვის ეფექტური აღმოჩნდა 1,5 ვ. რაზეც ნეირონმა უპასუხა 5 ქმედების პოტენციალით რის შემდეგაც დამყარდა პაბიტუაცია და ნეირონი აღარ გენერირებს ქმედების პოტენციალებს. სურათ 41ბ-ზე ვხედავთ იგივე იდენტიფიკაციის ნეირონის მიჩვევის დინამიკას იგივე სიდიდის სტიმულზე TEM CELL-ში ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების შემდეგ. 1800 მგაჰერცის ველი მოღუღირებულია 1 ჰერცი სიხშირით. დასხივებული ნეირონი გენერირებს მეტ ქმედების პოტენციალებს.



ა



ბ

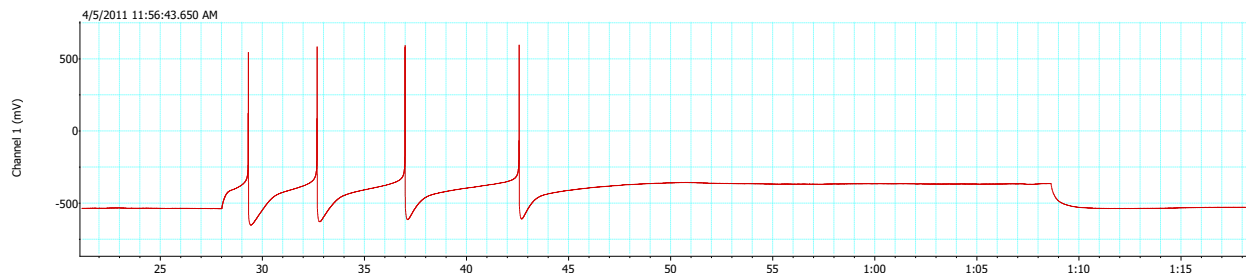
სურ.41

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
- ბ- 1800 მგაჰ ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოღუღაციის სიხშირე 1 ჰერცია. TEM CELL-ში შემაჯავლი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

სურათ 42 ა-ზე ილუსტრირებულია საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა 0,4 ვ ამპლიტუდის ძაბვის იმპულსით ნერვის სტიმულაციაზე. რეაქცია შედეგება 4

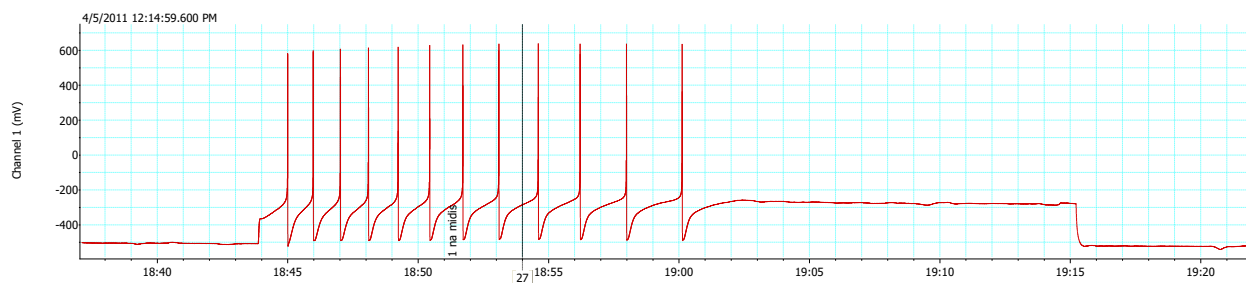
ქმედების პოტენციალისაგან, რის შემდეგაც დამყარდა ჰაბიტუაცია.
ელექტრომაგნიტური ველით დასხივებული იგივე იდენტიფიკაციის სხვა ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე ამპლიტუდის სტიმულზე ნაჩვენებია სურათ 42ბ-ზე. ნეირონმა სინაფსურ გარიზიანებას უპასუხა 12 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დამყარდა ჰაბიტუაცია.

5 April 2011



ა

5 April 2011

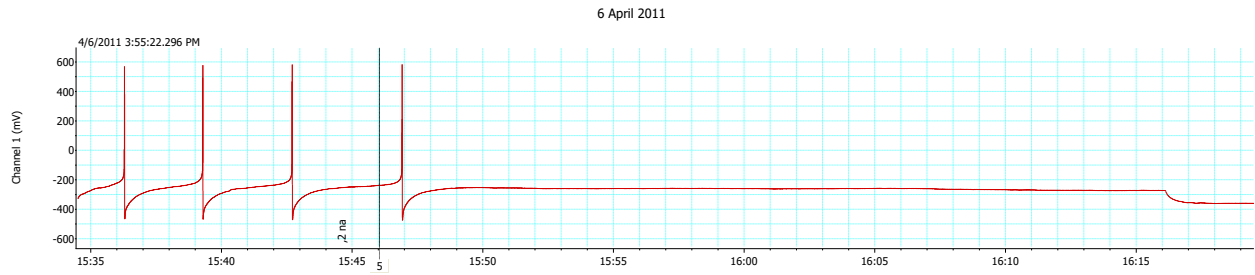


ბ

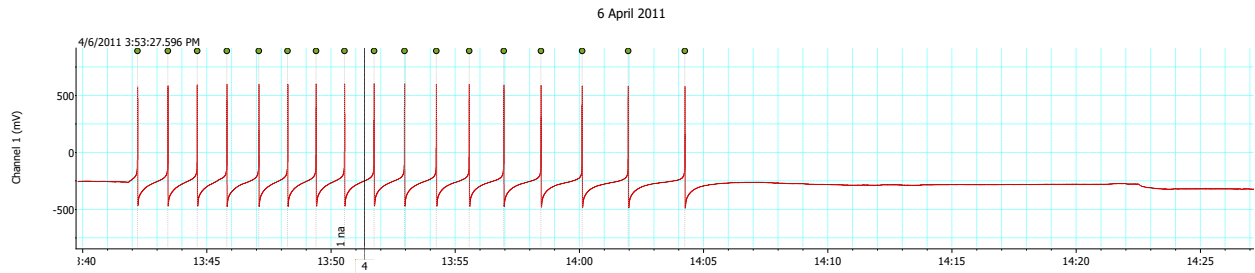
სურ 42.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე
- ბ- 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 2 ჰერცია. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

3 ჰერცი სიხშირით მოდულირებული ელექტრომაგნიტური ველის ნეირონზე ზემოქმედების ეფექტი ნაჩვენებია სურათ 43-ზე. 43ა დათმობილი აქვს საკონტროლო ნეირონის ჩანაწერს. პასუხად მიღებულია 4 ქმედების პოტენციალი. ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რიცხვი გაიზარდა 17-მდე.



ა

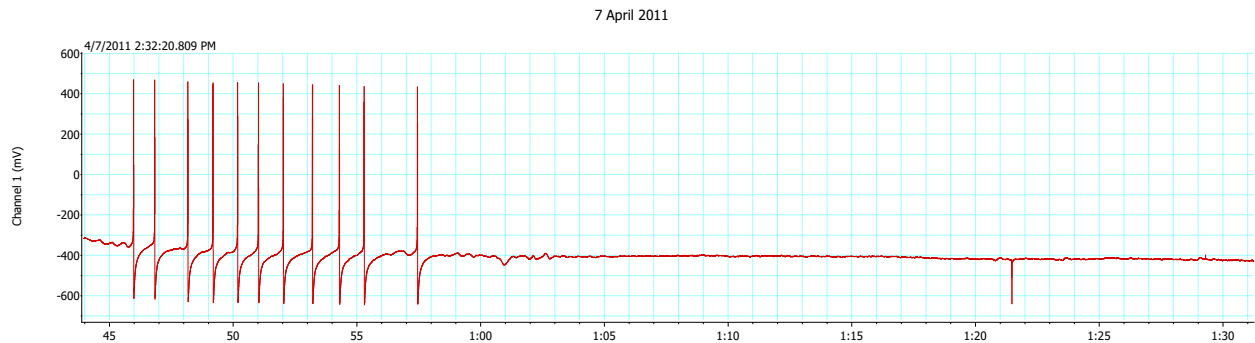


ბ

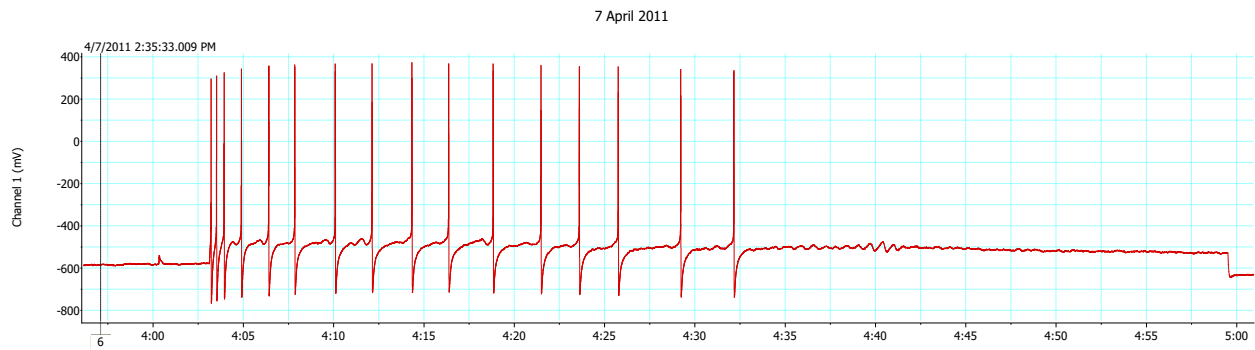
სურ 43.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
სტიმული ამპლიტუდა 1 ნა-ს შეადგენს.
- ბ- 1800 მკპც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 3 ჰერცია. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

მსგავსი ეფექტი აქვს 4 ჰერცი სიხშირით მოდულირებულ ელექტრომაგნიტურ ველს ნეირონზე. სურათ 44ა-ზე ისევ საკონტროლო ნეირონის სინაფსურ სტიმულზე რეაქციებია გამოსახული. ელექტრომაგნიტურ ველში მოთავსებამ მართალია გაზარდა გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რაოდენობა, თუმცა მათი აღმოცენების სიხშირე ოდნავ შემცირებულია.



ა

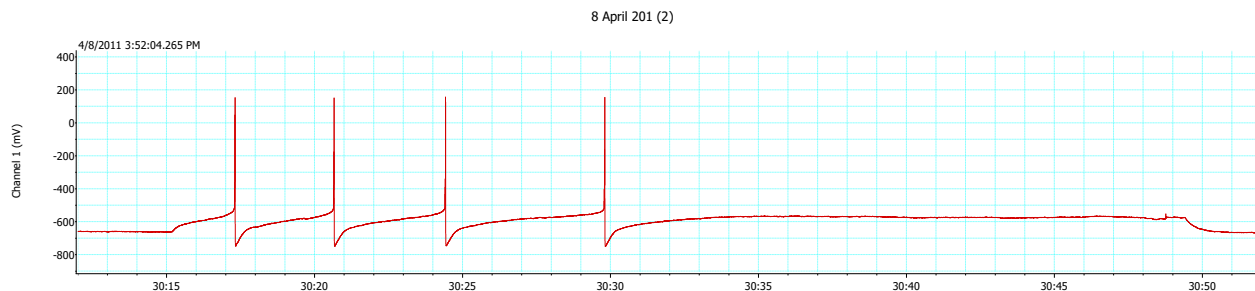


ბ

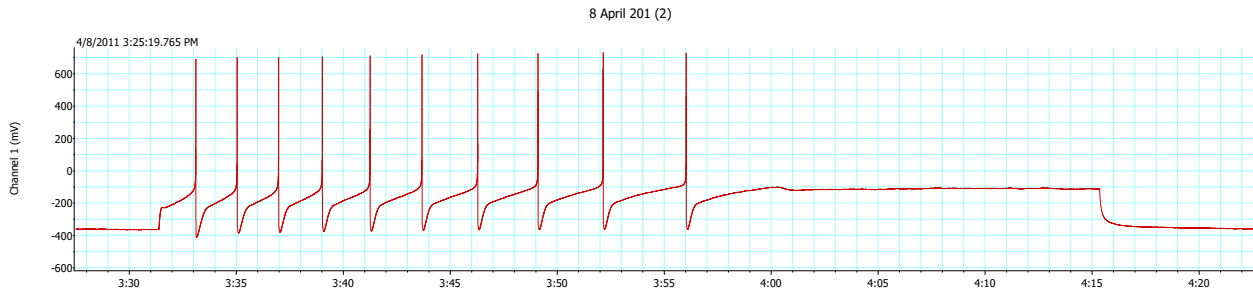
სურ 44.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
სტიმული ამპლიტუდა 1 ნა-ს შეადგენს.
- ბ- 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 4 პერცია. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

საკონტროლო ნეირონის რეაქციები ურთიერთ მსგავსია და ნეირონი სტიმულზე რეაგირებს 5-7 ქმედების პოტენციალით. სურათი 45ა-ზე ნაჩვენებია მორიგი საკონტროლო ნეირონის რეაქციები სტიმულზე. აქაც მიჩვევის დადგომამდე გენერირებულ იქნა 4 ქმედების პოტენციალი. 2,5ჯერ ძლიერი რეაქცია აქვს დასხივებულ ნეირონს. დასხივება მოხდა 1800 მგჰც სიხშირის ველში 5 პერცი სიხშირით მოდულაციის პირობებში -- სურ 45 ბ.



ა

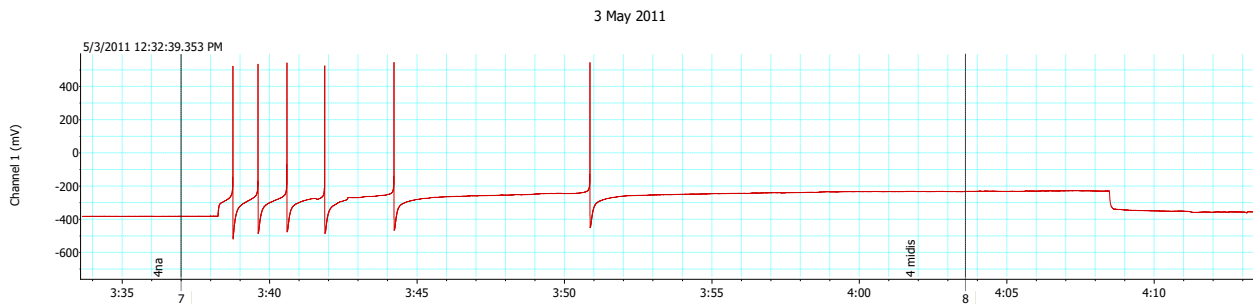


ბ

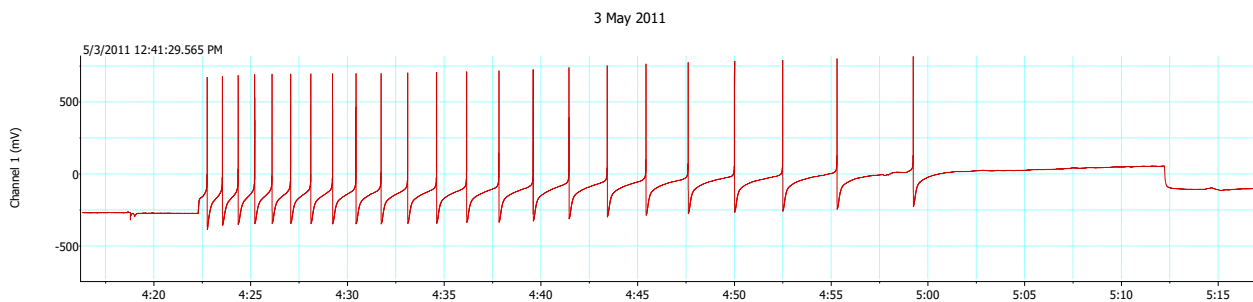
სურ 45.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. სტიმული ამპლიტუდა 1,5 ნა-ს შეადგენს.
- ბ- 5 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მეჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

სურათ 46ა-ზე ნაჩვენებია საკონტროლო ნეირონის (RPG#3) რეაქცია სინაფსურ სტიმულაციაზე. ჰაბიტუაცია დამყარდა 13 წამში 6 ქმედების პოტენციალის გენერირების ფონზე. ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებული ნეირონის (RPGN#3) იგივე ამპლიტუდის მქონე სინაფსურ სტიმულაციაზე პასუხები მოცემულია სურათ 46ბ-ზე. ამ შემთხვევაში 1800 მეგაჰერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველი მოდულირებული იყო 6 პერცი სიხშირით. ამ შემთხვევაში სრულ ჰაბიტუაციას დასჭირდა 18 წამი. გენერირებულ იქნა 23 ქმედების პოტენციალი.



ბ

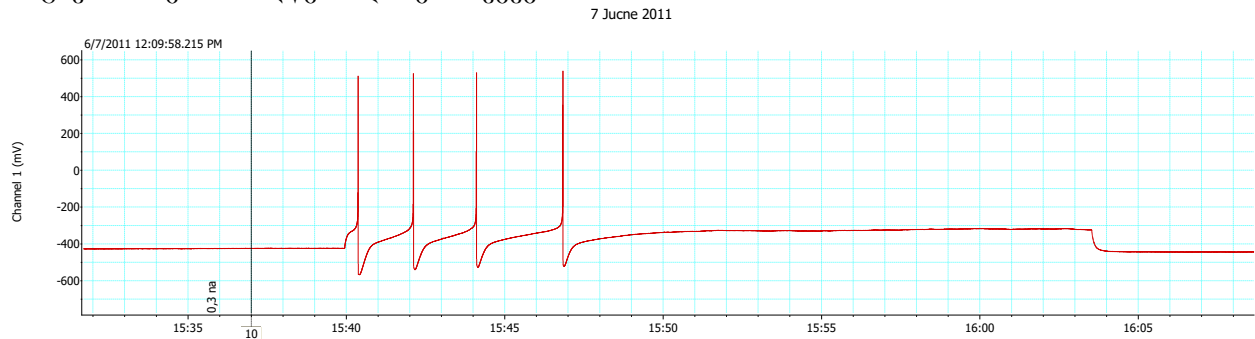


ბ

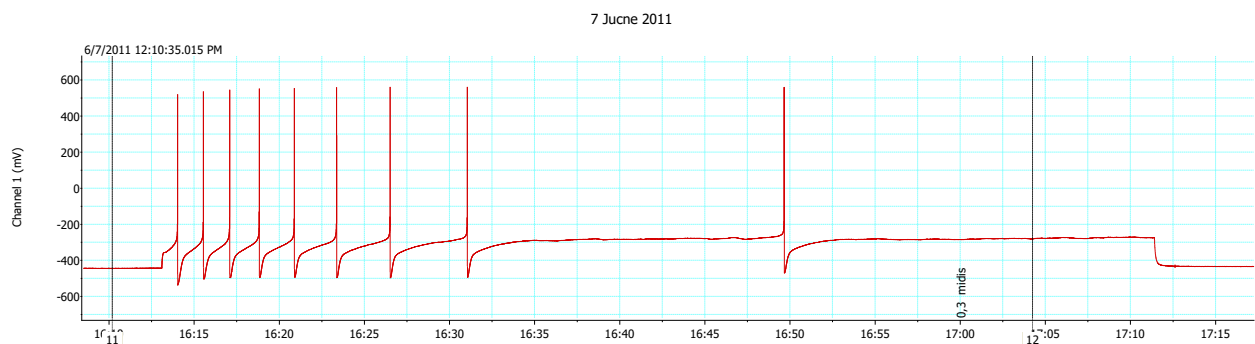
სურ 46.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. 6 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

7 პერცით მოდულირებული და შესაბამისი საკონტროლო ნეირონების რეაქციები (RPG#3) ნაჩვენებია სურათზე 47-ზე. როგორც ვხედავთ თანაფარდობა საკონტროლო ნეირონისა და დახსივებული ნეირონის სინაფსურ სტიმულაციაზე რეაქციებს შორის მსგავსია ზემოთ აღწერილ შემთხვევებისა.



ბ

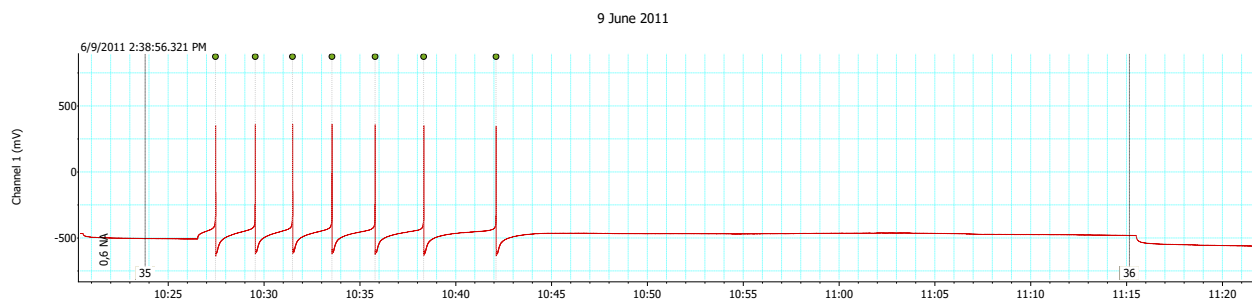


ბ

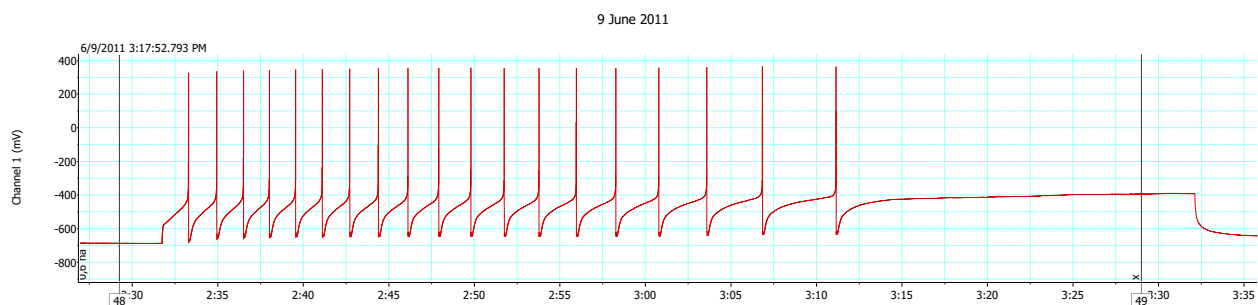
სურ 47.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
ბ- 7 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

სურათ 48-50-ზე შესაბამისად ვხედავთ 8-10 პერცი სიხშირით (1800 მგჰც ელექტრომაგნიტური ველის) მოდულაციის ეფექტს სინაფსური სტიმულაციის მიმართ მიჩვევის დინამიკაზე.



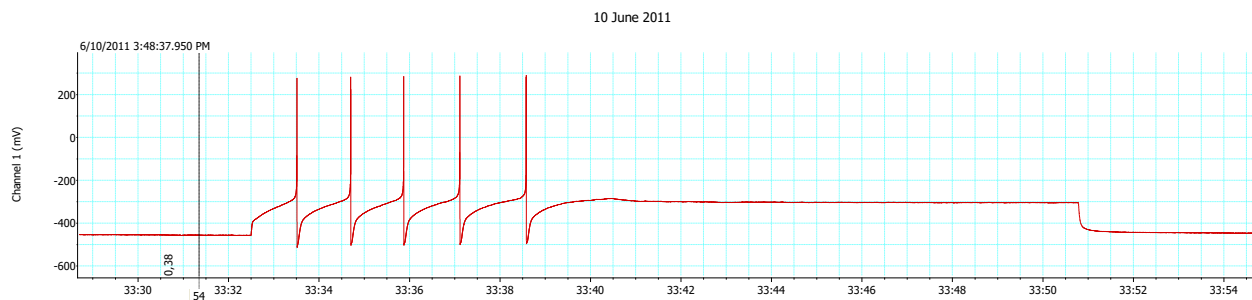
ა



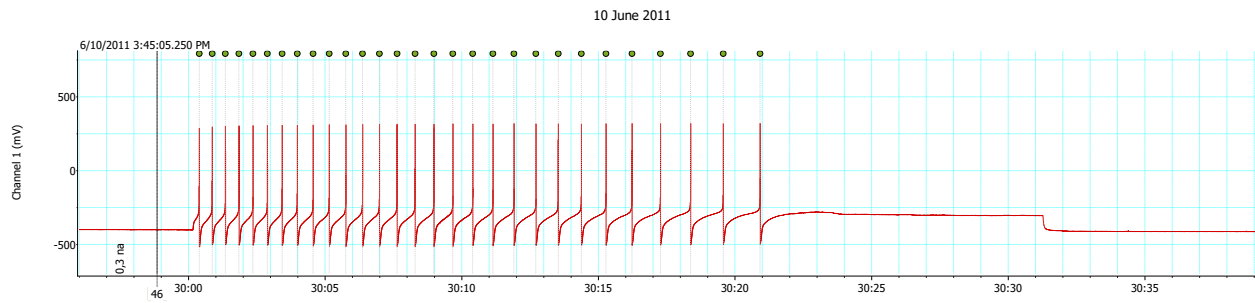
ბ

სურ 48.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
- ბ- 8 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მკპც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.



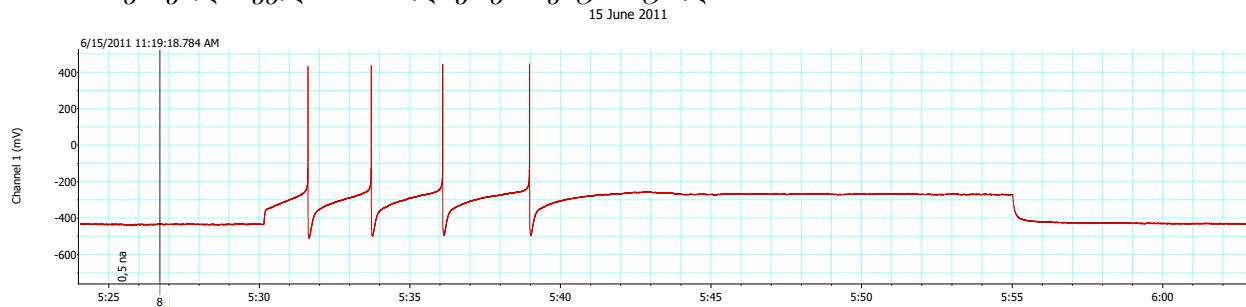
ა



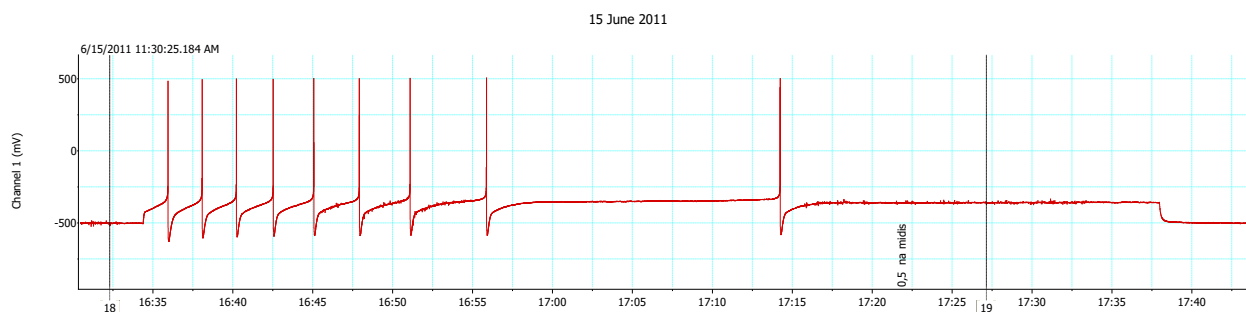
ბ

სურ 49.

- ა- საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
- ბ- 9 ჰერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მგპც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 9 ჰერცია. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.



ბ



ბ

სურ 50.

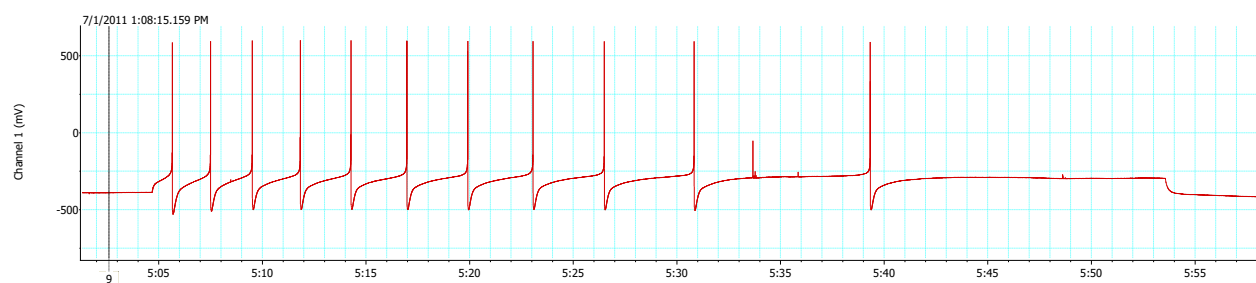
1. საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.
2. 10 ჰც მოდულირებული ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

ექსპერიმენტების მონაცემთა სტატისტიკური დამუშავებისათვის ჩატარდა ექსპერიმენტული მასალის დამატებითი გაამოკვლევა “Chart Peak Analysis” საშუალებით. გაიზომა ყველა ქმედების პოტენციალების პარამეტრები როგორც საკონტროლო ისევე დასხივებული ნეირონებისათვის: ქმედების პოტენციალის ამპლიტუდა; სიგანე, კვალური ჰიპერპოლარიზაციის ამპლიტუდა, კვალური ჰიპერპოლარიზაციის სიგანე, პაბიტუაციის დრო, გენერირებულ იმპულსთა საშუალო სიხშირე.

სურათ 51 ა-ზე ნაჩვენებია ერთერთი დასხივებული ნეირონის (იდენტიფიცირებული ნეირონი LPGN³) რეაქცია ნერვის სტიმულაციაზე. რაზეც ნეირონმა უპასუხა 11 ქმედების პოტენციალით რის შემდეგაც დამყარდა მიჩვევა (პაბიტუაცია) და ნეირონი აღარ გენერირებს ქმედების პოტენციალებს. პაბიტუაციისათვის საჭირო დრო 35 წამის ტოლია. სურათ 51ბ-ზე ვხედავთ საკონტროლო პრეპარატის ასევე LPGN³ ნეირონის ნეირონის მიჩვევის დინამიკას. აქაც აღმოცენდა 11 ქმედების პოტენციალი, თუმცა მიჩვევისათვის საჭირო დრო ბევრად ნაკლებია და შეადგენს 14,5 წამს. ვხედავთ რომ დასხივებული ნეირონი მეტად ადგზნებადია . ასევე გახანგრძლივებულის მიჩვევისათვის საჭირო დრო. შევადაროთ 35 და 14,5 წამები.

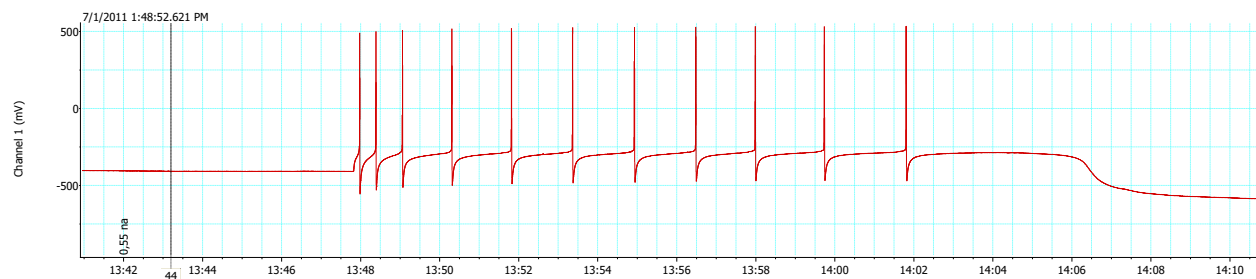
1800 მგაჰერცის ველი მოდულირებულია 11 ჰერცი სიხშირით.

1 July 2011



ა

1 July 2011

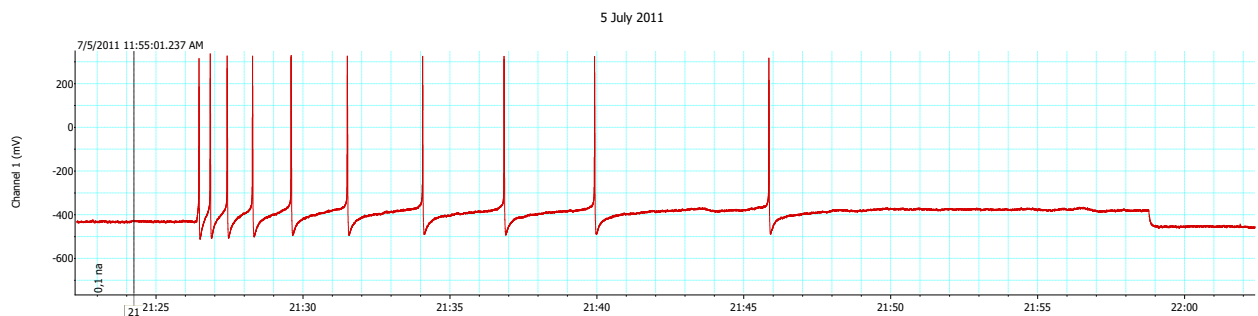


ბ

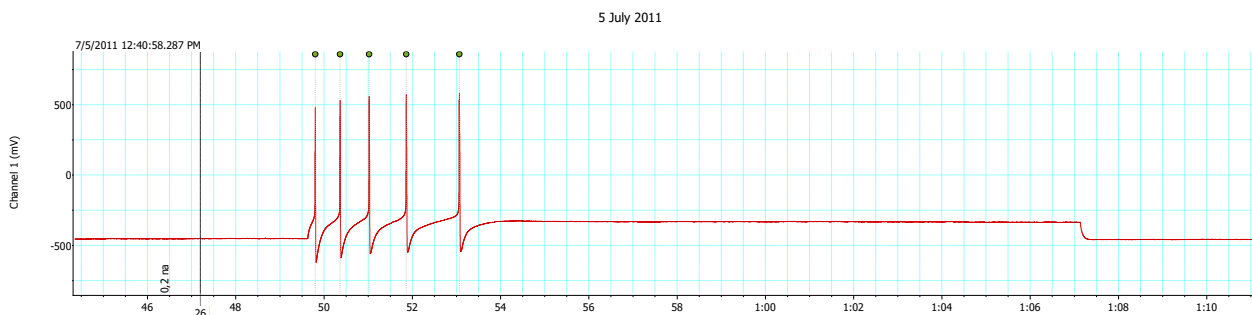
სურ. 51

ა 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში დასხივებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 11 ჰერცია. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა ნერვის სტიმულაციაზე.

სურათ 52 ა-ზე ილუსტრირებულია დასხივებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა ნერვის სტიმულაციაზე. რეაქცია შედგება 10 ქმედების პოტენციალისაგან, რის შემდეგაც დამყარდა პლატო. მიჩვევის დრომ შეადგინა 20,1 წმ. სხვა განგლის საკონტროლო იგივე იდენტიფიკაციის ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სტიმულზე ნაჩვენებია სურათ 52ბ-ზე. ნეირონმა სინაფსურ გალიზიანებას უპასუხა 7 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დამყარდა პლატო. მიჩვევის დრომ შეადგინა 4.8 წამი. ამ ექსპერიმენტში ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 12 ჰერცის ტოლია. ამ შემთხვევაშიც აშკარად გამოიკვეთა ექსპოზიციის შედეგად ნეირონის აღზნებადობის გაზრდა და პლატოსათვის საჭირო დროის გახანგრძლივება.



ა



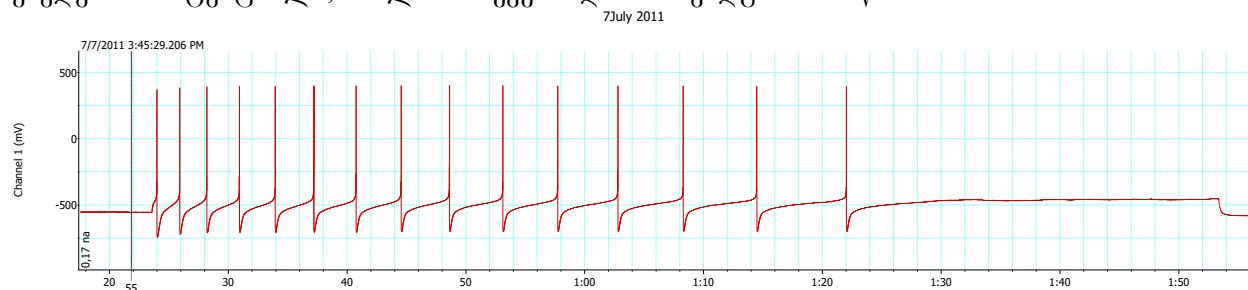
ბ

სურ 52.

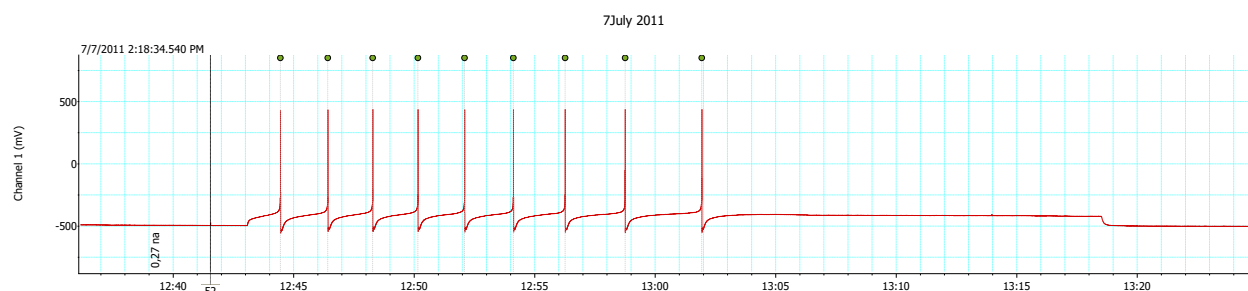
ა 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 12 ჰერცია. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.

13 ჰერცი სიხშირით მოდულირებული ელექტრომაგნიტური ველის ნეირონზე ზემოქმედების ეფექტი ნაჩვენებია სურათ 53-ზე. 53ა დათმობილი აქვს ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებულ ნეირონის ჩანაწერს. პასუხად მიღებულია 15 ქმედების პოტენციალი. ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების პლატოსათვის დრო შეადგენს 59,75 წამს. 3ბ-ზე ილუსტრირებულია ამავე დღის ექსპერიმენტში საკონტროლო განგლის იგივე იდენტიფიკაციის ნეირონის ჩანაწერი. ნეირონის

ნერვის სტიმულაცია მოხდა 0,6 ვ ამპლიტუდის იმპულსებით. პასუხად გენერირდა 9 ქმედების პოტენციალი, ხოლო მიჩვევის დრომ შეადგინა 20 წამი.



ა

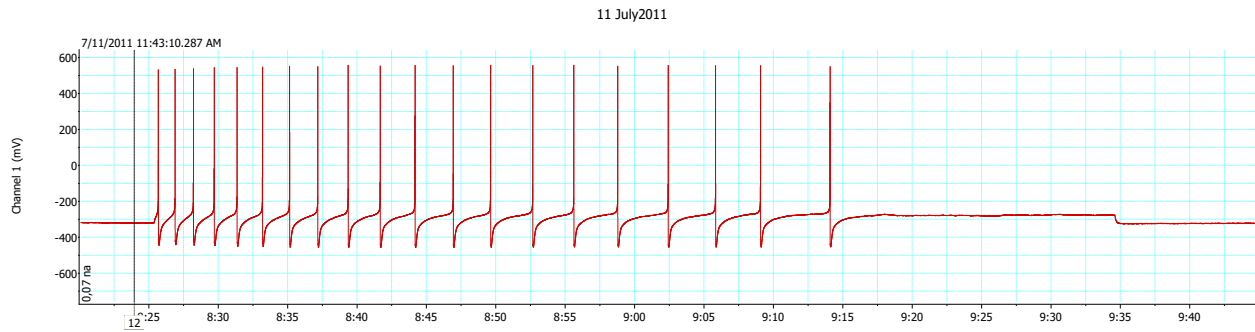


ბ

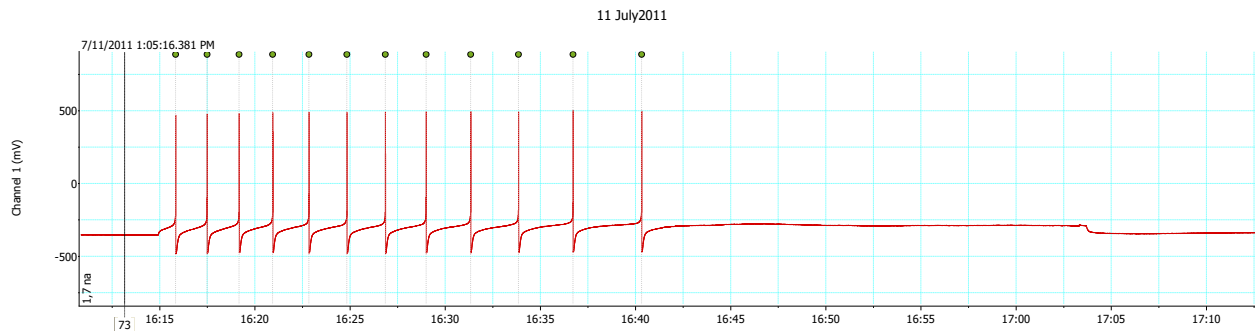
სურ 3.

ა 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 13 ჰერცი. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. სტიმული ამპლიტუდა იგივეა.

14 ჰერცი სიხშირით მოდულირებულ ელექტრომაგნიტურ ველის ნეირონის ჰაბიტუაციის პროცესზე ზეგავლენა ილუსტრირებულია მე-54 ა სურათზე. ნეირონი სხივდებოდა 60 წუთის განმავლობაში აღნიშნული სახის ელექტრომაგნიტური ველით. ჰაბიტუაციის დადგომამდე სათანადო რეაქცია შეადგენდა 20 ქმედების პოტენციალის გენერირებას. ჰაბიტუაციას დასჭირდა 49,3 წამი. სურათ 54ბ-ზე კი საკონტროლო ნეირონის სინაფსურ სტიმულზე რეაქციებია გამოსახული. გენერირებულ ქმედების პოტენციალთა რიცხვი შეადგენს 12. მიჩვევისათვის საჭირო დრო 26 წამის ტოლია.



ა



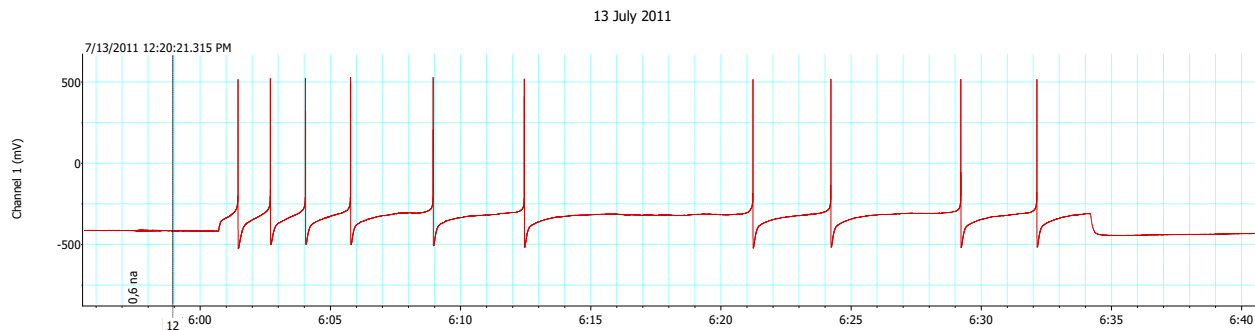
ბ

სურ 54.

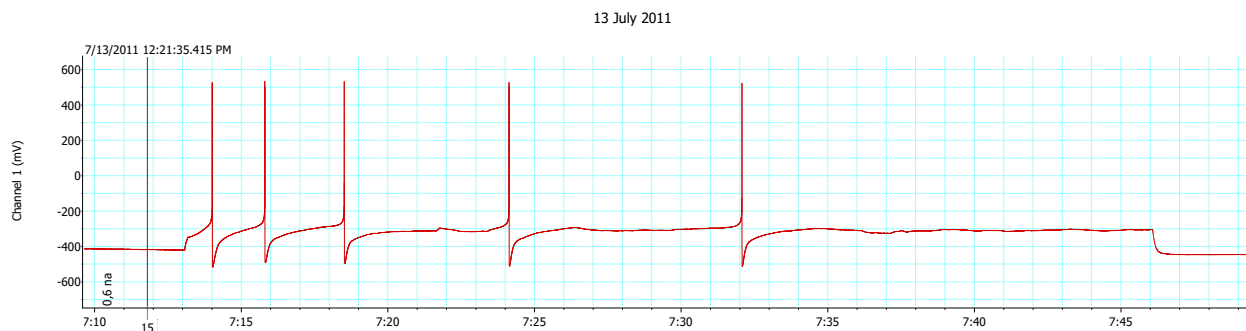
ა 14 პერციით მოდულირებული 1800 მგპც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა სტიმულის მიმართ. TEM CELI-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

ბ საკონტროლო ნეირონის მიხვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.

სურათი 55ა-ზე ნაჩვენებია მორიგი დასხივებული ნეირონის რეაქციები სტიმულზე. ველის მოდულირების სიხშირე 15 ჰერცს შეადგენს. დასხივებულ ნეირონის შემთხვევაში მიხვევის დადგომამდე გენერირებულ იქნა 10 ქმედების პოტენციალი, რასაც დაჭირდა 32 წამი მაგრამ კაბიტუაციის არ დამდგარა. საკონტროლო ნეირონისდმი იგივე სტიმულის მიწოდებისას აღმოცენდა 5 ქმედების პოტენციალი ხოლო მოხვევას დასჭირდა 20,5 წამი - სურ 55 ბ.



ა



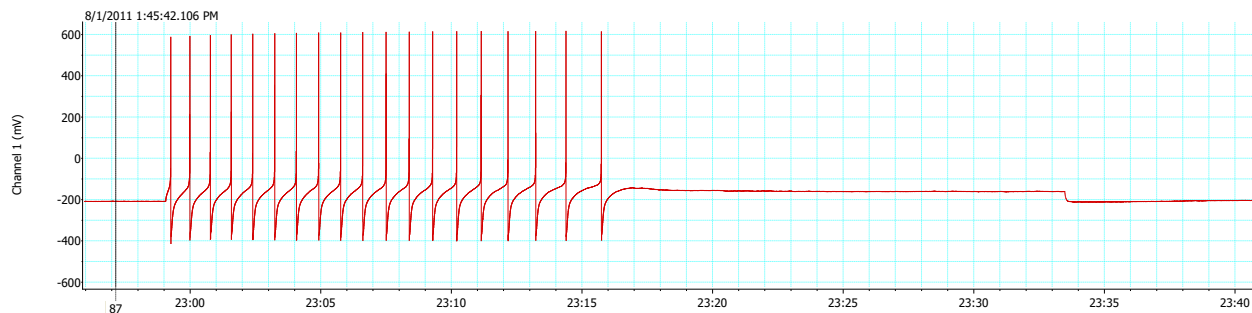
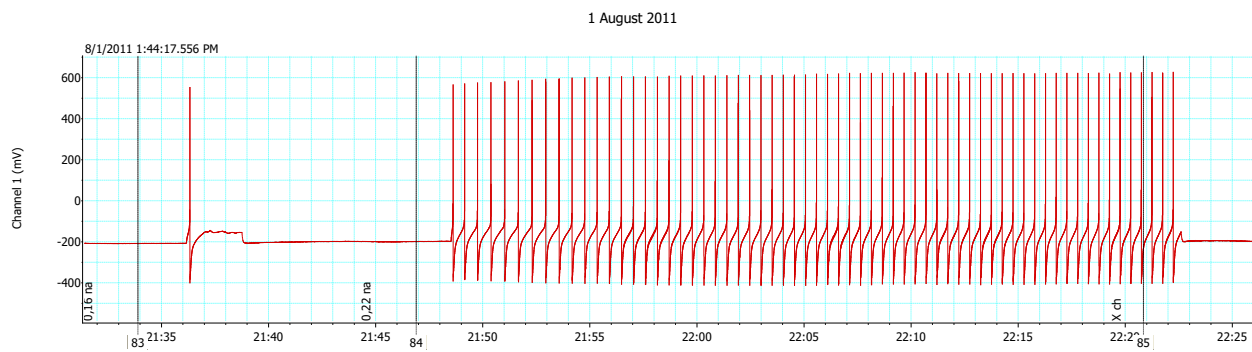
ბ

სურ 55.

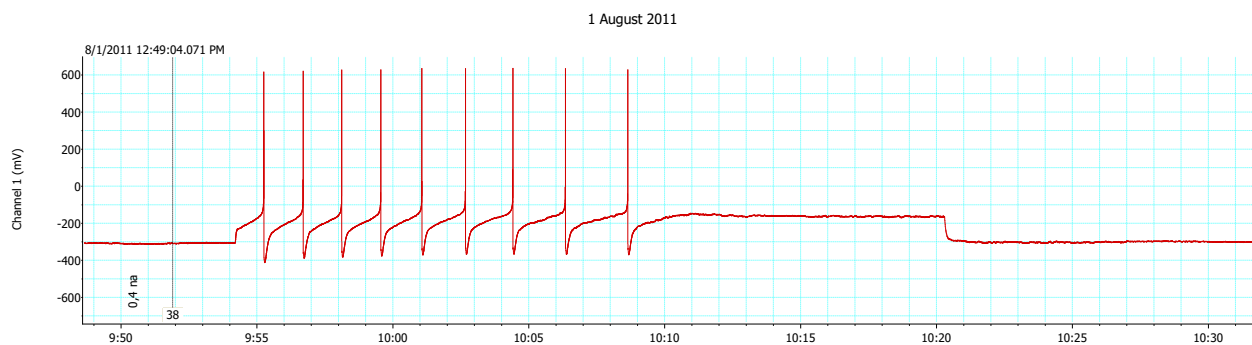
ა 15 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მკჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა. სტიმული შეადგენს 0,6 ე-ს. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სინაფსურ სტიმულაციაზე.

სურათ 56ა-ზე ნაჩვენებია TEM CELL-ში ექსპოზირებული იდენტიფიცირებული ნეირონის (LPG#3) რეაქცია სინაფსურ სტიმულაციაზე სტიმულს ნეირონმა უპასუხა 1 ქმედების პოტენციალით. სტიმულის აწევამ გამოიწვია ხანგრძლივი და ძლიერი რეაქცია. სტიმულის უკან დაწევის შემდეგ დამყარდა მიჩვევა. სურათ 56ბ-ზე მოცემულია საკონტროლო ნეირონის (LPG№3) სინაფსურ სტიმულაციაზე პასუხები. ადვილი შესამჩნევია, რომ თითმის ორჯერ ძლიერი სტიმული ნეირონში ნაკლებ რეაქციებს იწვევს – სრულ პაბიტუაციას დასჭირდა 15,3 წამი.



ა

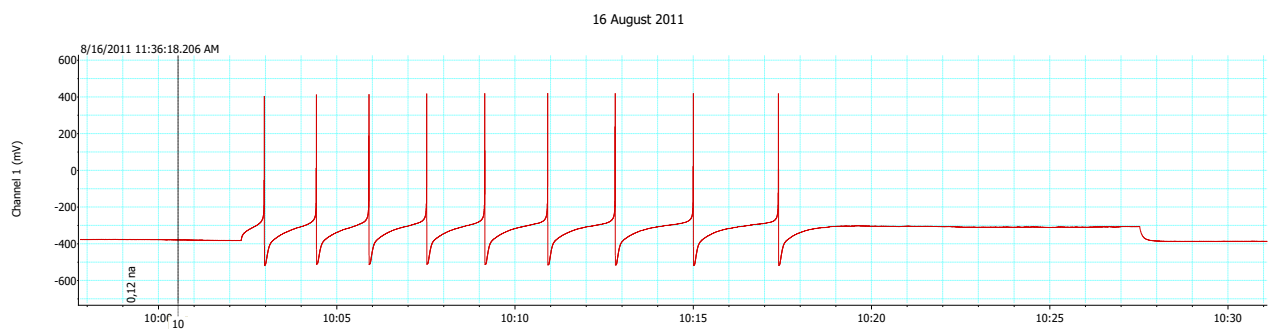


ბ

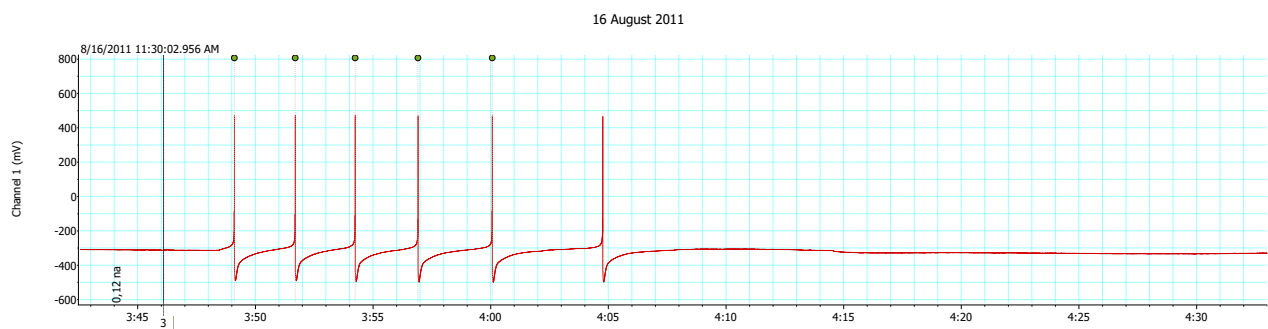
სურ 56.

ა 16 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მკჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიხვევა სინაფსურ სტიმულზე.

17 პერციტ მოდულირებული სახიფებულო და შესაბამისი საკონტროლო ნეირონების რეაქციები (RPG#3) ნაჩვენებია სურათზე 57. მოყვნილია TEM CELL-ში დასხივებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. რეაქცია შედგება 9 ქმედების პოტენციალისაგან. მიხვევისათვის საჭირო დრომ 15.9 წამი შეადგინა. 7ბ-ზე ვხედავთ საკონტროლო ნეირონის მიხვევის დინამიკას.



ა

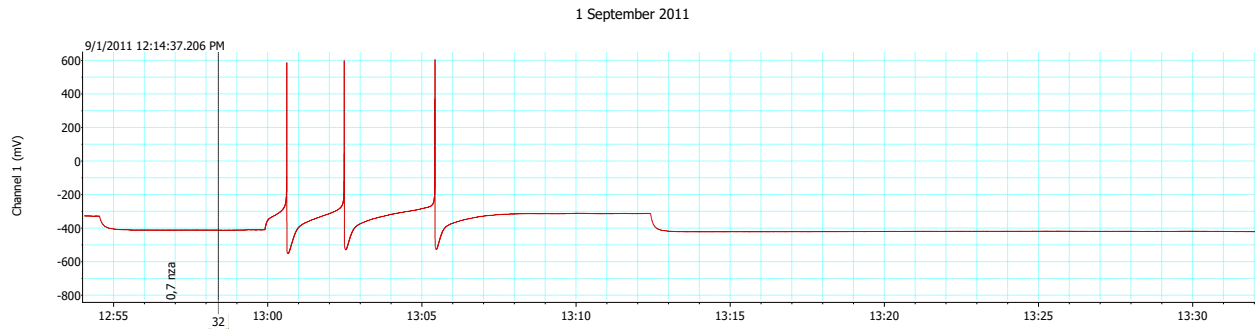


ბ

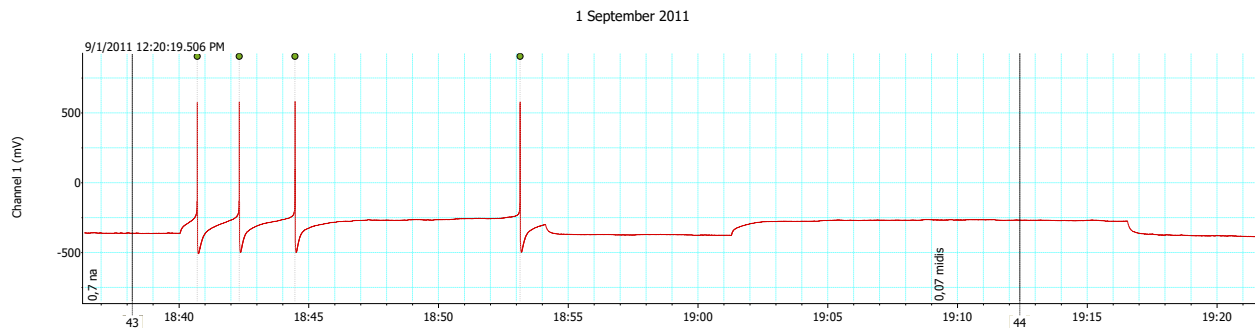
სურ 57.

ა 17 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში დასხივებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა იგივე სიდიდის სინაფსურ სტიმულაციაზე.

18 პერციტ მოდულირებული 1800 მგჰც სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის სინაფსურ სტიმულის მიმართ მიჩვევაზე ნაჩვენებების სურათ 58-ზე. სურ 58ა-ზე ვხედავთ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკას, ხოლო 58ბ-ზე დასხივებულისას იგივე სიდიდის სტიმულზე.



ა



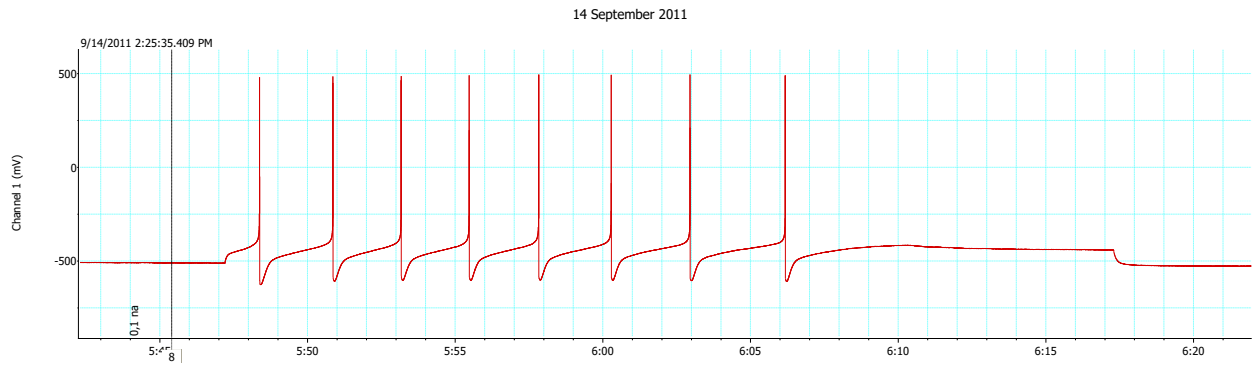
ბ

სურ 8.

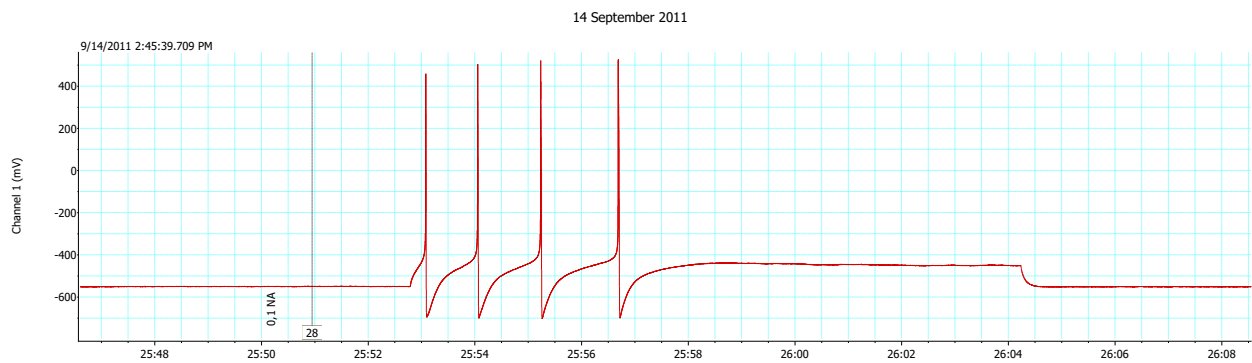
ა საკონტროლო ნეირონის მიხვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. (წერტილები ქმედების პოტენციალის თავზე ამ და ყველა სხვა შემთხვევაში დასვა პროგრამამ, რომელიც ქმედების პოტენციალების პარამეტრების შესასწავლადაა განკუთვნილი.)

ბ 18 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მკპც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა სტიმულზე. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

19 პერცი სიხშირის მოდულაციის ეფექტები მე-59 სურათზეა ილუსტრირებული. 59ა არის დახივებული ნეირონის რეაქციები და მიხვევის სურათი. ხოლო 59ბ საკონტროლო ნეირონის რეაქცია და მიხვევაა. ორივე შემთხვევაში სტიმული ერთმანეთის ტოლია. დასხივებულმა ნეირონმა ორჯერ მეტი რაოდენობის იმპულსებით უპასუხა სიდიდით ტოლ სტიმულს.



ა



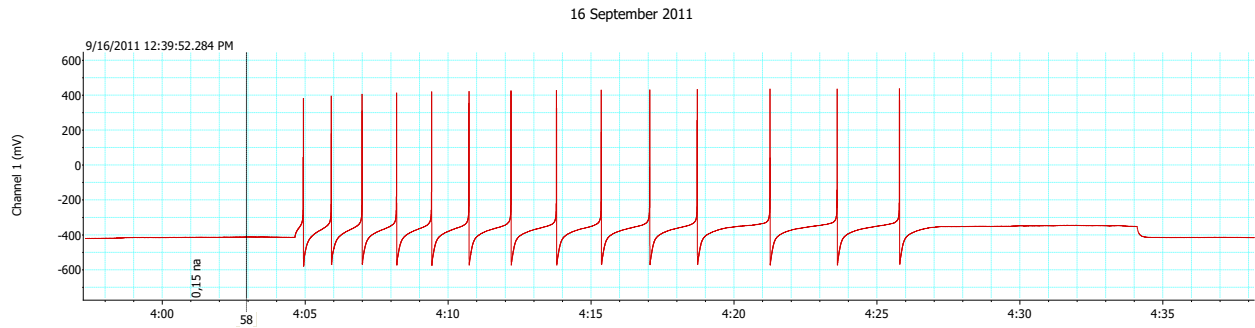
ბ

სურ 59.

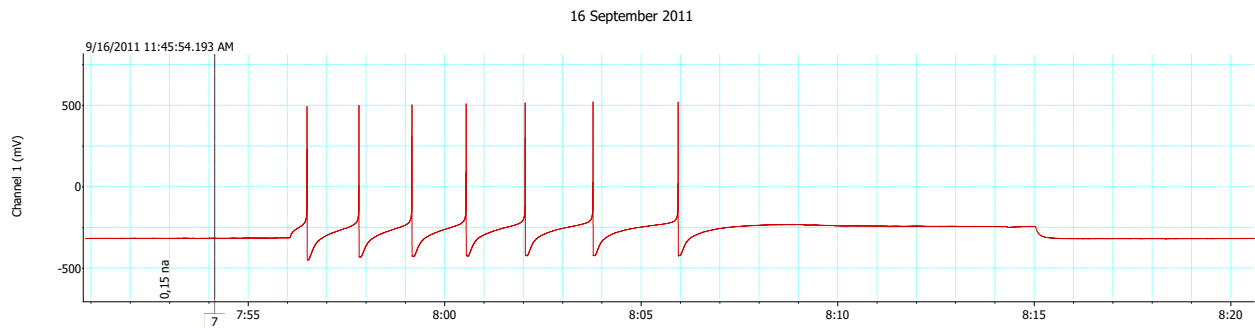
ა 19 პერცი სიხშირით მოდულირებული 1800 მკჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიხვევის დინამიკა სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 19 პერცია. TEM CELL-ში შემავალი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.

ბ საკონტროლო ნეირონის მიხვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე. სტიმული ამპლიტუდა აქაც 0,2 ვ-ს შეადგენს.

20 პერცით მოდულაციის სურათი ილუსტრირებულია 60-ე სურათზე. სინაფსურ სტიმულს ნეირონმა უპასუხა 14 ქმედების პოტენციალით. მიხვევისათვის საჭირო დრომ 22 წამი შეადგინა. იგივე ამპლიტუდის მქონე სტიმულზე საკონტროლო ნეირონის რეაქციები აშკარად ნაკლებია. ჰაბიტუაციისათვის საჭირო დრო ასევე თითქმის 2 ჯერ ნაკლებია და 10,75 წამის ტოლია.



ა



ბ

სურ 60.

ა 1800 მგჰც ელექტრომაგნიტურ ველში ექსპოზიცირებული ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სტიმულზე. ელექტრომაგნიტური ველის მოდულაციის სიხშირე 20 ჰერცია. TEM CELI-ში შემაჯავლი ველის სიმძლავრე 5 ვატის ტოლია.
ბ საკონტროლო ნეირონის მიჩვევის დინამიკა სინაფსურ სტიმულაციაზე.

შედეგი:

1-20 ჰერცი სიხშირით მოდულირებული ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად ნეირონის სინაფსურად გასაღიზიანებლად ნაკლები ამპლიტუდის მქონე სტიმული აღმოჩნდა საჭირო, ე.ი ველში ექსპოზიციით გაიზარდა ნეირონის აღზნებადობა. ადგილი აქვს მიჩვევისათვის საჭირო დროის გახანგრძლივებას საკონტროლო ნეირონებთან შედარებით.

დაბალი სიხშირის ემე გავლენა ნეირონზე

ამოცანების გეგმის თანახმად შესასწავლი იყო 1-20 ჰერცი დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის (ემე) ნეირონის უჯრედშიგა და სინაფსურ სტიმულაციებზე მიჩვევის პროცესზე გავლენის გამოკვლევა. აღნიშნული სიხშირეები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მოდულაციის დაბალი სიხშირეები GSM სიგნალებში. დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველების მისაღებად გამოყენებულ იქნა ჩვენს მიერ დამუშავებული და შექმნილი ჰელმჰოლცის კოჭები.

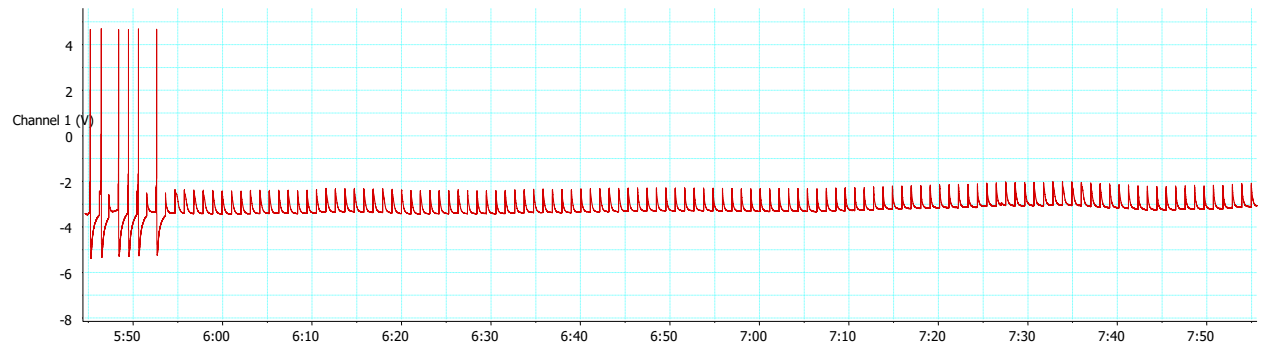
ჰელმჰოლცის კოჭებში მუდმივი დენის გატარების შედეგად მათ ცენტრში მიიღება ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი. თუ კოჭებში გავატარებთ ცვლად დენს (ჩვენს შემთხვევაში 1 დან 20 -მდე ჰერცი სიხშირის ცვლად დენს, მაშინ კოჭების ცენტრში მიიღება ცვლადი ელექტრომაგნიტური ველი რომლის სიხშირე ემთხვევა გატარებულ დენის სიხშირეს. ამრიგად, საკვლევი ნეირონის მოთავსება კოჭების ცენტრში განაპირობებს ამ ნეირონების დასხივებას შესაბამისი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველით. განსხვავებით მაღალი სიხშირეების ექსპერიმენტებისა, სადაც დასხივებისათვის TEM Cell-ს ვიყენებდით, ამ შემთხვევაში შესაძლებელი იყო ნეირონის რეაქციებზე ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების დაკვირვება უშუალოდ დახივების პირობებში, რადგან მიკროელექტროდების მოთავსება ნეირონში შესაძლებელია კოჭებში არსებული ცარიელი არეების გავლის საშუალებით. ელექტრომაგნიტური ველის მაგნიტური

ხანმოკლე უჯრედშიგა იმპულსების შერჩევა სტიმულაციისათვის შემდეგი მოსაზრებით არის განპირობებული: სტიმული იწვევს ნეირონის დეპოლარიზაციას. დეპოლარიზაციის ეს ტალღა მასტიმულირებული ელექტროდის წვერიდან მიემართება აქსონურ ბორცვისაკენ, სადაც განლაგებულია ქმედების პოტენციალის აღმოცენების ტრიგერული ზონა. სტიმულის მოძრაობა ამ ზონამდე ელექტროტონურია და განაპირობებს ლატენცურ პერიოდს. ჩვენს მიერ შერჩეული სტიმულის ხანგრძლივობა-4 მილიწამი კი გაცილებით ნაკლებია ლატენცურ პერიოდთან შედარებით, ამიტომ ნებისმიერი ეფექტი, რომელიც შეიძლება დამზერილ იქნას არის მხოლოდ და მხოლოდ დასხივების ზემოქმედების შედეგი და არ შეიძლება მიეწეროს სტიმულაციის სახეს.

როდესაც ხდება ნეირონის სინაფსური სტიმულაცია, აქაც მასტიმულირებელ აგენტად შევარჩიეთ ასევე იმპულსები, ოდინდ არა დენის არამედ ძაბვისა. სტიმული მოედება მარცხენა პალიალური ნერვის განშოტებას, რაც სტიმულაციის ინვარიანტობას განაპირობებს.

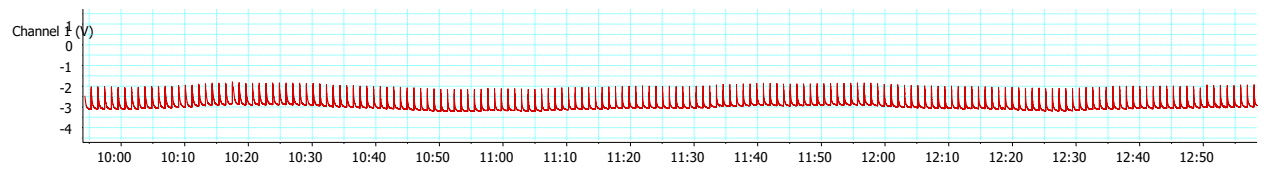
სურათ 61ა-ზე ნაჩვენებია საკონტროლო ნეირონის რეაქციები და მიჩვევის დინამიკა სტიმულაციაზე. სტიმულის ამპლიტუდა შეადგენს 0.6 ნა-ს, რაც ოდნავ მეტია მის ზღურბლოვან მნიშვნელობაზე. ვხედავთ რომ ნეირონმა სტიმულს უპასუხა 6 ქმედების პოტენციალით, რის შემდეგაც დამყარდა სრული ჰაბიტუაცია. ჰაბიტუაციის დამყარების შემდეგ ჩანაწერში ვაკვირდებით მხოლოდ მცირე ზომის არტეფაქტულ “კბილანებს”. თუ კი ჰაბიტუაციის დადგომის შემდეგ სტიმულის მიწოდებას არ შევწყვეტთ, ჩანაწერში ფისქირდება მხოლოდ “კბილანები”, რაგინდ დიდხანს არ უნდა ხდებოდეს სტიმულაცია. სურ 61ბ ნაჩვენებია იგივე ნეირონის უჯრედშიგა ჩანაწერი სტიმულაციის მე-5 წუთზე. ნეირონის ჰაბიტუაციის დინამიკა და მასზე 1 ჰერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ილუსტრირებულია სურათ 61გ-ზე. აქ სტიმულის ამპლიტუდა 0.5 ნა-ს ტოლია. ნეირონმა სტიმულაციას უპასუხა 38 ქმედების პოტენციალით. ჰაბიტუაციას დაჭირდა 68 წამი. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 3 წუთის შემდეგ ჩართულ იქნა 1 ჰერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველი. ველის დაძაბულობა 15 მილიტესლაა. ვხედავთ რომ , ნეირონმა მოახდინა ქმედების პოტენციალთა გენერირება. ველის გამორთვის შემდეგ ქმედების პოტენციალების გენერირება უმაღლეს შემწვდა –სურ 61დ.

5 November 2011.adicht



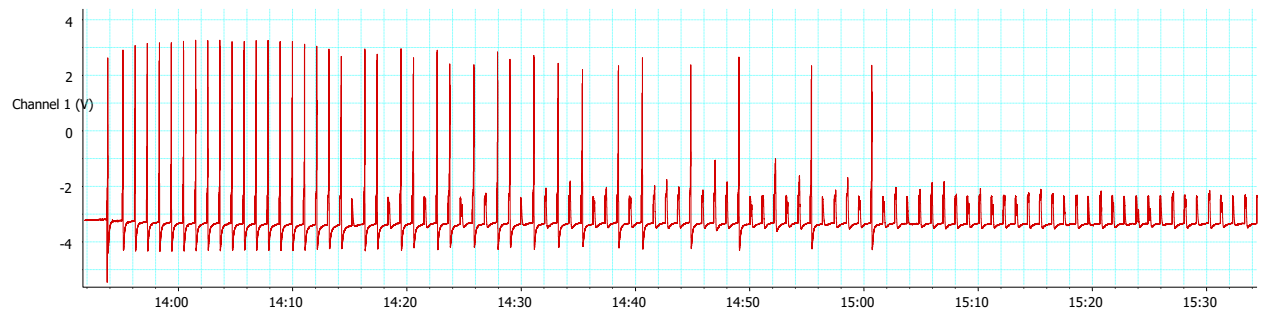
8

5 November 2011.adicht



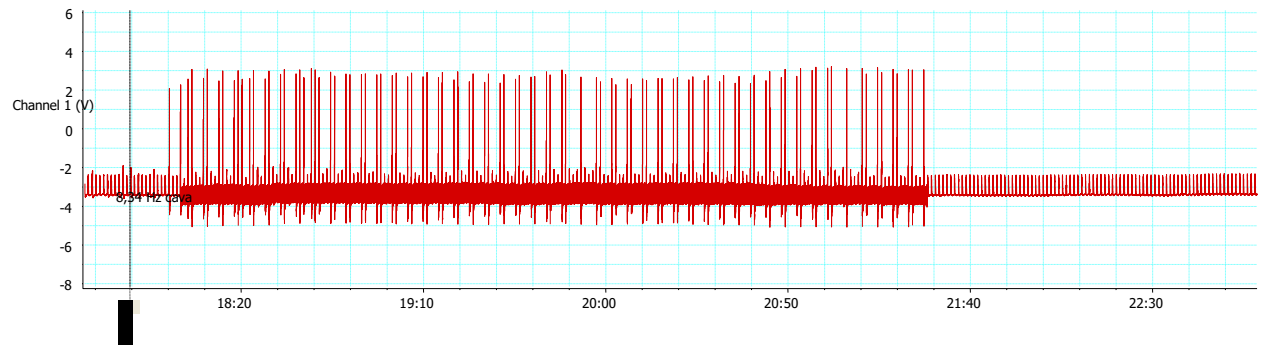
8

16 November 2011 (1).adicht



8

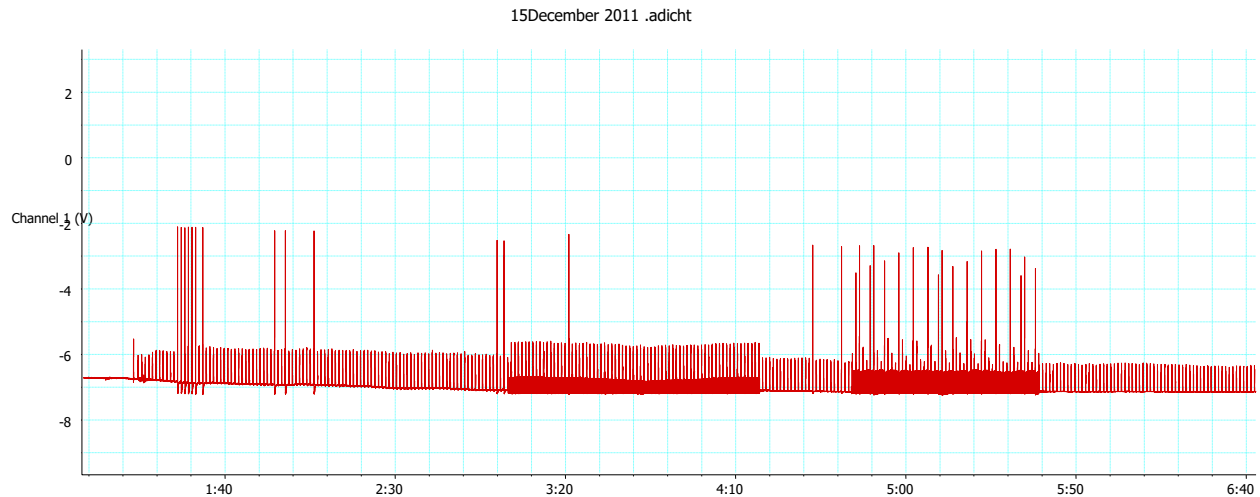
16 November 2011 (1).adicht



8

სურ. 61 ა) ბ) და გ) საკონტროლო ნეირონებია, დ) დასხივებული ნეირონია

სურათ 62-ზე ნაჩვენებია 2 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის პაბიტუაციაზე და დეპაბიტუაციაზე. თავდაპირველად ნეირონი მიეჩვენა სტიმულს, რასაც 42 წამი დასჭირდა. პაბიტუაციის დადგომიდან 52-ე წამზე ჩართულ იქნა 10 მილიტესლა დაძაბულობის ელექტრომაგნიტური ველი. ნეირონმა მას რამოდენიმე ქმედების პოტენციალის აღმოცენებით უპასუხა. ველის ხანმოკლე გამორთვისა და ისევ ჩართვის შემდეგ ნეირონის რეაქციები უფრო მკვეთრად აღსდგა, თუმცა ველის გამორთვისთანავე ქმედების პოტენციალთა გენერირება შეწყდა.

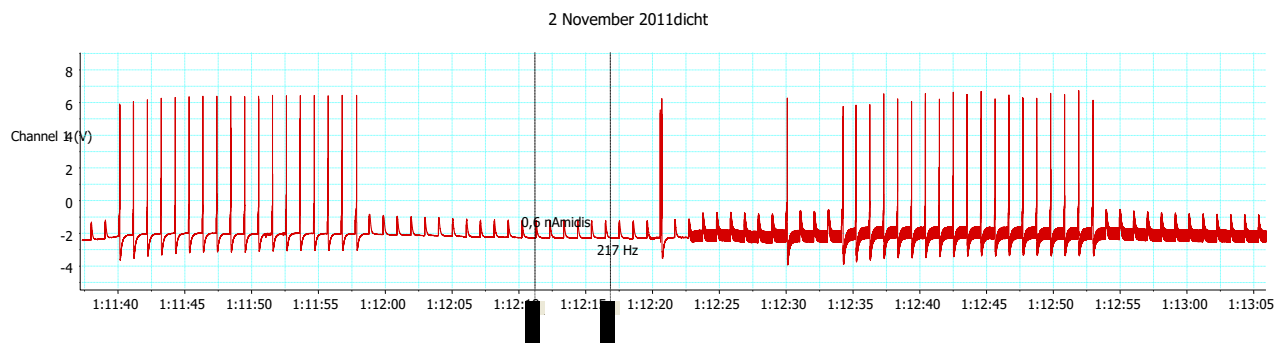


სურ. 62.

2 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა დეპაბიტუაციაზე.

სურათ 63-ზე ნაჩვენებია 3 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველით დასხივებული ნეირონების მიხვევის დინამიკა უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ.

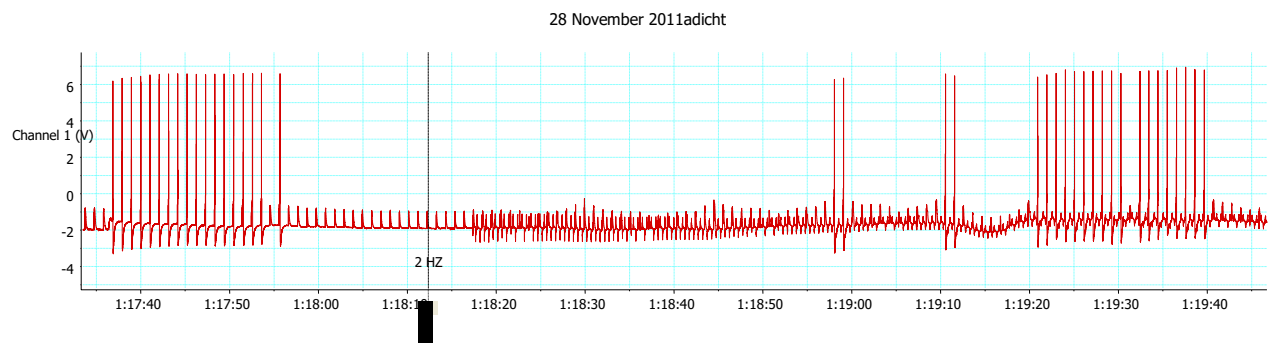
მიხვევა დამყარდა 18 წამში 18 ქმედების პოტენციალის გენერირების შემდეგ. პაბიტუაციის დადგომიდან 0,5 წუთის შემდეგ ჩართულ იქნა 3 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველი 15 მილიტესლა დაძაბულობით. დეპაბიტუაცია აშკარადაა გამოიკვეთილი.



სურ. 63.

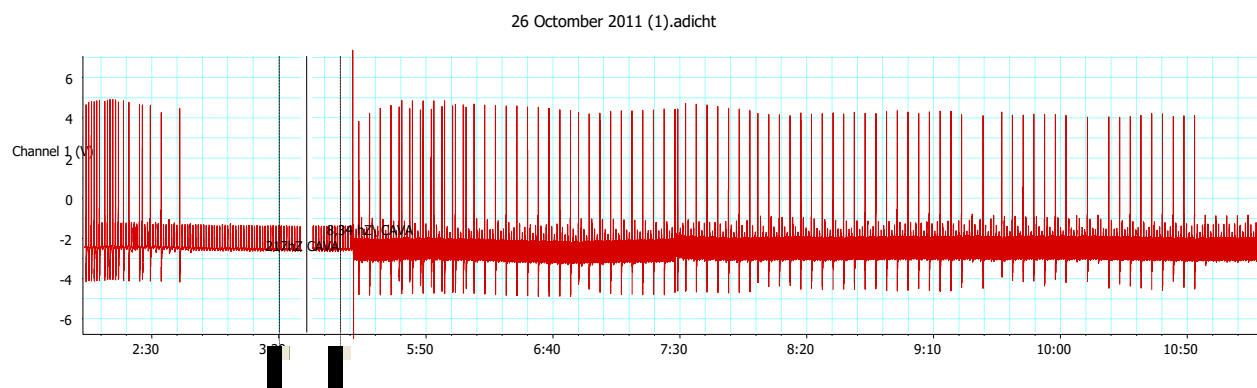
3 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა დეჰაბიტუაციაზე.

სურ 64-ზე ნაჩვენებია 4 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ჰაბიტუაციის დარღვევაზე.

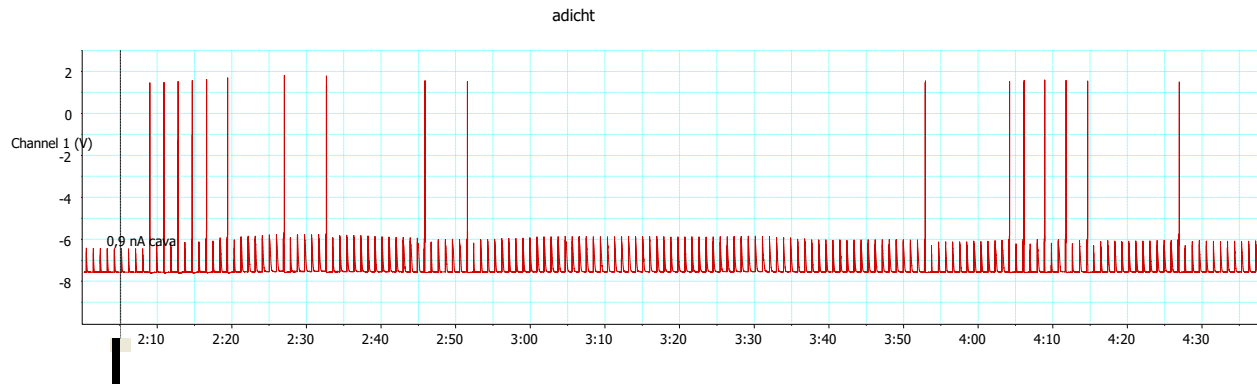


სურ. 64 ჰაბიტუაციის დაღვევა 4 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის ჩართვის შედეგად.

მე- 65-ე სურათზე ვხედავთ 5 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის მიერ ჰაბიტუაციის დაღვევას:



სურ. 65 . 5 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ჰაბიტუაციის დარღვევაზე.

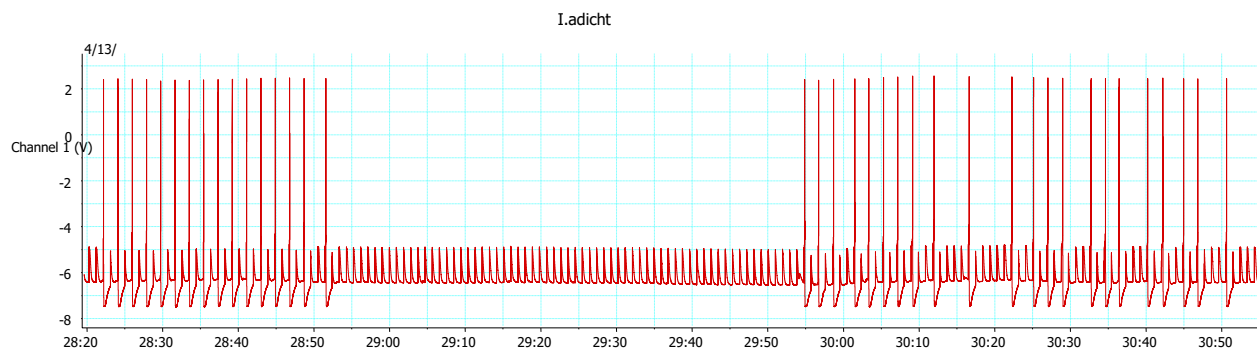


სურ. 66

სურათ 66-ზე ნაჩვენებია 6 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის მიჩვევის დინამიკაზე. იმისათვის რომ მიგველო ქარგა “1 ქმედების პოტენციალი 1 სტიმულზე” საწყისი სტიმულის ამპლიტუდად შევარჩიეთ ზღურბლს ქვედა მნიშვნელობა 0,6 ნა. 10 ასეთ სტიმულზე ნეირონს რეაქციები არ აქვს-ის სურ-ის დასაწყისი. შემდეგ სტიმულის ამპლიტუდა აწეულ იქნა 0,9 ნა-მდე. ნეირონმა მათ უპასუხა ქმედების პოტენციალებით. მათი რაოდენობა შეადგენს 10. ქმედების პოტენციალების გენერირების შემდეგ ნეირონი მიეჩვია სტიმულს. ჩანაწერში შეინიშნება მხოლოდ სტიმულის მიერ გამოწვეული მცირე არტეფაქტები. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 1 წუთის შემდეგ ჰელმჰოლცის კოჭებში გატარებულ იქნა 6 პერცი სიხშირის ცვალი დენი, რამაც ნეირონის მოთავსების ადგილზე შექმნა 10 მილიტესლა დაძაბულობის ელექტრომაგნიტური ველი. ველის ჩართვამ გამოიწვია ნეირონის მიერ რამდენიმე ქმედების პოტენციალების აღმოცენება.

სურათ 67-ზე ნაჩვენებია 7 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველით დასხივებული ნეირონების მიჩვევის დინამიკა უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ.

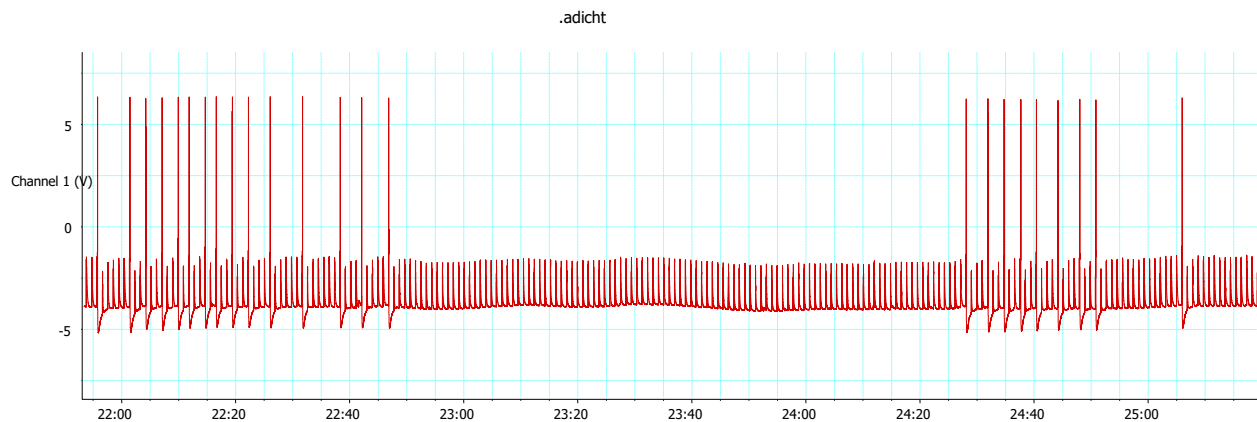
აქ ზღურბლოვანი სტიმულის ამპლიტუდა 1,5 ნა ტოლი აღმოჩნდა. ნეირონი სტიმულს მიეჩვია 29,6 წამის შემდეგ. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 62 წამის შემდეგ ჩართულ იქნა 7 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველი 10 მილიტესლა დაძაბულობით. დეჰაბიტუაცია ხანგრძლივად გამოიკვეთა.



სურ. 67

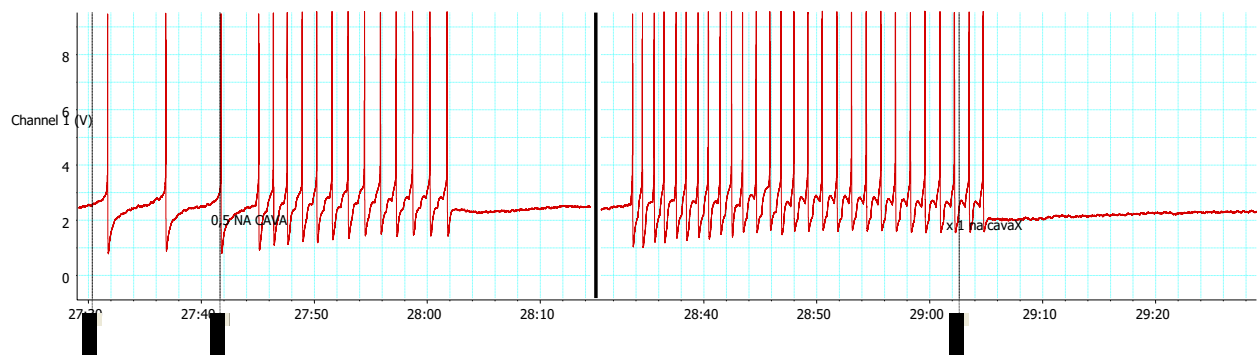
7 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედება ნეირონის მიჩვევასა და მიჩვევის დარღვევაზე.

აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ ცვლად ელექტრომაგნიტურ ველში მოთავსება ყოველთვის იწვევს მიჩვევის დარღვევას, თუმცა რაიმე სტატისტიკური გავსხვავება მიჩვევის დარღვევის დინამიკაში ან სხვა რომელიმე პარამეტრში გამოკვლეულ სიხშირეებისათვის არ იქნა გამოვლენილი. ამიტომ შემდეგ სურათზე ნაჩვენებია მხოლოდ 10 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა დეჰაბიტუაციაზე,



სურ. 68

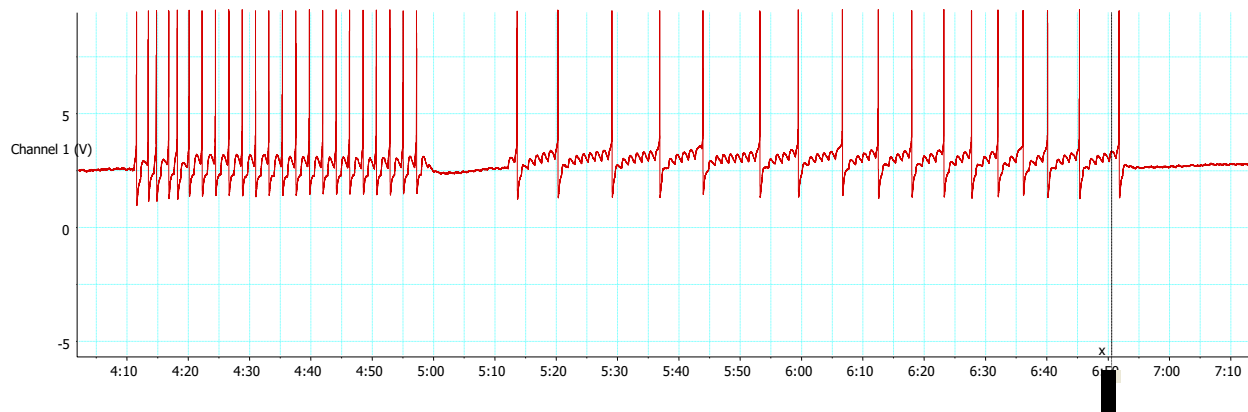
10 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის ჩართვის შედეგად გამოწვეული პაბიტუაციის დაღვევა. ველის დაძაბულობა 10 მილი ტესლაა.



სურათი 69. ნეირონის მიჩვევის დინამიკა და პაბიტუაციის დარღვევა მაგნიტური ველის მოდების პირობებში. მაგნიტური ველის სიხშირეა 11 პერცი, ამპლიტუდა შეადგენს 10 მილიტესლას.

სურათ 70-ზე ნაჩვენებია 12 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის ჩართვის გავლენა ნეირონის პაბიტუაციის დათრგუნვაზე. ნეირონის უჯრედს შიგნით სტიმულაცია დაიწყო დროის მომენტიდან რომელსაც აბსცისათა ღერძზე შეესაბამება 4:20. 5:00-ზე დამყარდა პაბიტუაცია- შეწყდა ქმედების პოტენციალების გენერირება სტიმულის

მიმართ. 7 წამის შემდეგ ჩართულ იქნა 12 პერცის მქონე ცვლადი მაგნიტური ველი. ველის ამპლიტუდაა 10 მილიტესლა. მაგნიტური ველი ჩართული იყო 5:10-დან 6:50-მდე. მოხდა ჰაბიტუაციის დარღვევა. მაგნიტური ველის გამორთვისთანავე ქმედების პოტენციალების გენერირება შეწყდა და აღსდგა ჰაბიტუაცია.

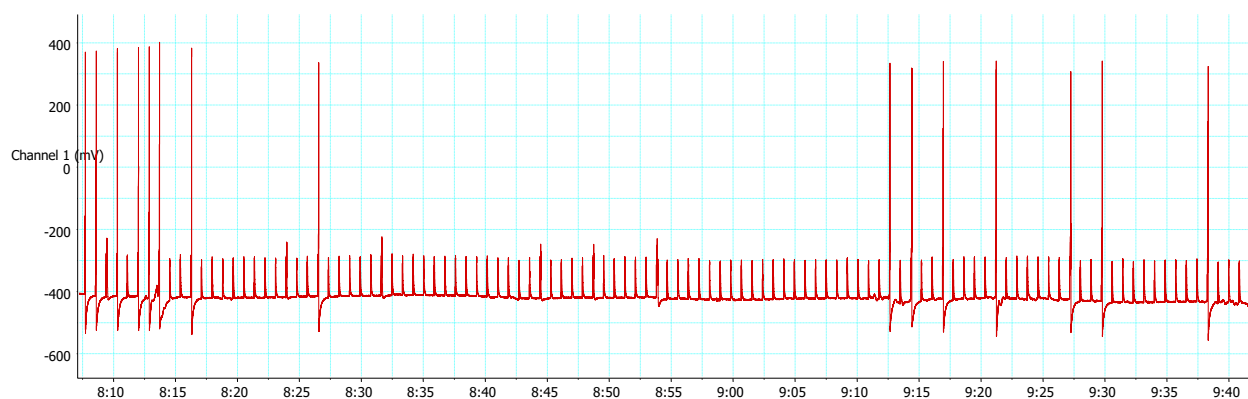


სურ. 70.

12 პერცი სიხშირის მქონე ცვლადი მაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის უჯრედშიგა სტიმულაციაზე ჰაბიტუაციის დარღვევაზე.

სურათ 71-ზე ნაჩვენებია 13 პერცი სიხშირის მქონე ცვლადი მაგნიტური ველით დასხივებული ნეირონების მიხვევის დათრგუნვის სურათი უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ.

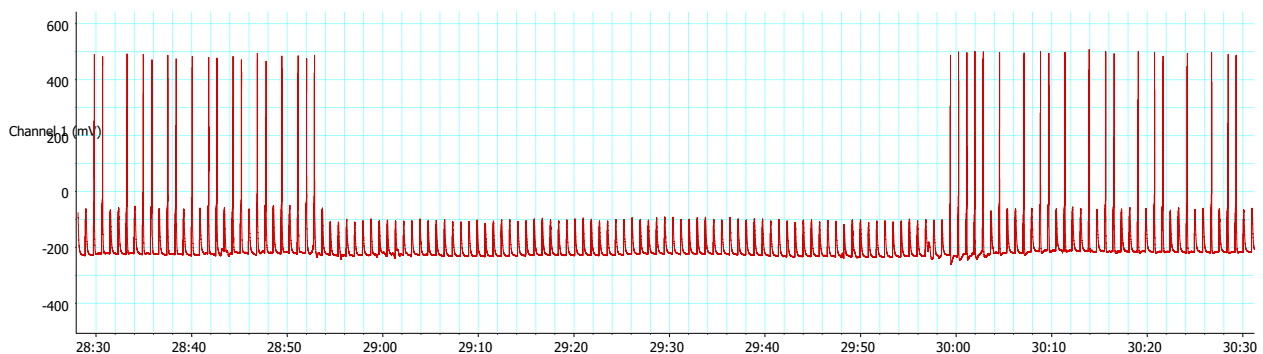
აქ ზღურბლოვანი სტიმულის ამპლიტუდა 0,7 ნა იყო. ნეირონი სტიმულს მიეჩვია 19 წამის შემდეგ. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 45 წამის შემდეგ ჩართულ იქნა 13 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველი, რომლის დაძაბულობის ამპლიტუდაა 10 მილიტესლა. დეჰაბიტუაცია აშკარად გამოიკვეთა, თუმცა ნეირონი ქმედების პოტენციალებით პასუხობს არა ყველა უჯრედშსშიგა სტიმულს.



სურ. 71

13 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედება ნეირონის მიხვევაზე უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ და ამ მიხვევის დარღვევა 13 პერცი სიხშირის მქონე ცვლადი მაგნიტური ველის მოდებისას.

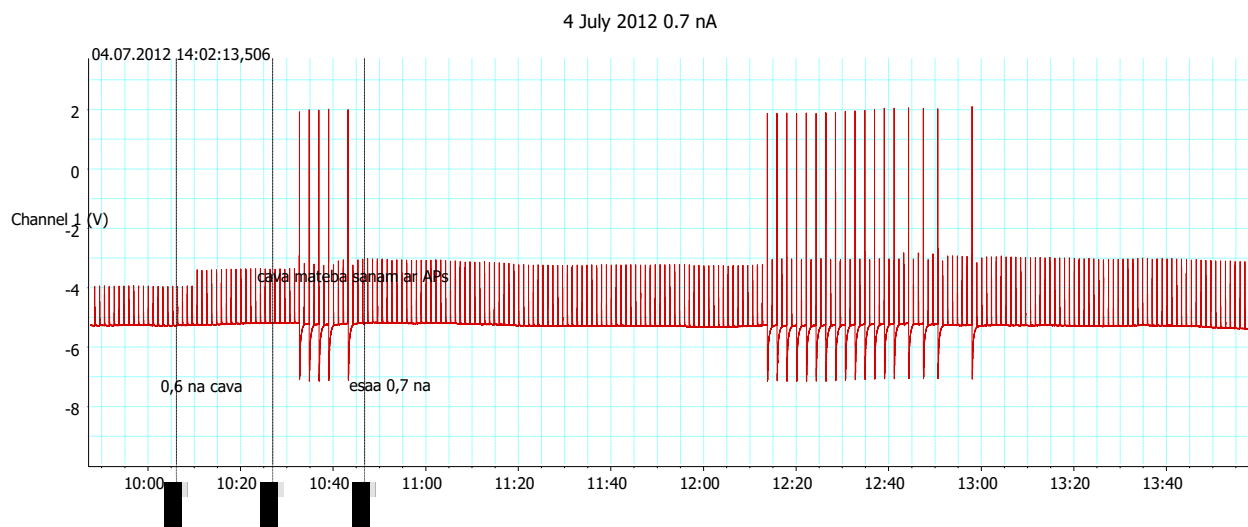
სურათ 72-ზე ილუსტრირებულია 14 პერცი სიხშირის ცვლადი მაგნიტური ველის გავლენა დეჰაბიტუაციაზე. მასტიმულირებელი სტიმულის ამპლიტუდა იყო 1,5 ნა. ამის გამო რეაქციები დიდხანს გაგრძელდა. ოსცილოგრამაზე ვხედავთ მხოლოდ ჰაბიტუაციის დადგომის მომენტს 20:52-ე წამზე. მიუხედავად ჰაბიტუაციის დადგომისა სტიმულაცია გაგრძელდა. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 1 წუთის შემდეგ მოდებულ იქნა 14 პერცი სიხშირის ცვლადი მაგნიტური ველი. ვეილს ჩართულობა გაგრძელდა 30 წამის განმავლობაში. მოელი ამ დროის განმავლობაში ჰაბიტუაცია დაითრგუნა და ნეირონი პასუხობს სტიმულს ქმედების პოტენციალებით.



სურ. 72.

14 პერცი სიხშირის ცვლადი მაგნიტური ველის ჩართვის შედეგად გამოწვეული ჰაბიტუაციის დაღვევა. ველის დაძაბულობა 10 მილი ტესლაა.

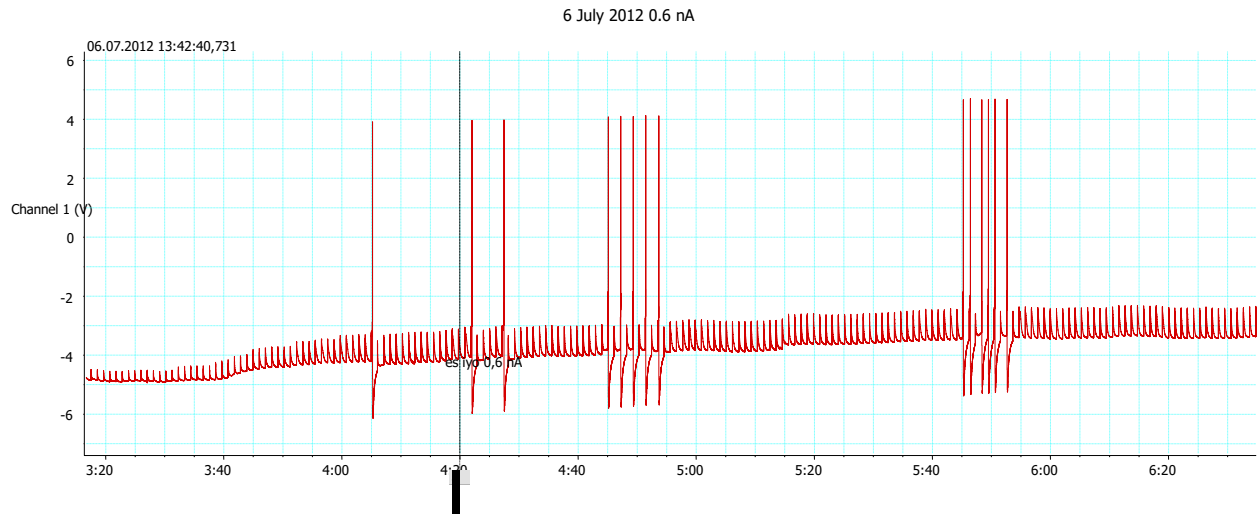
სურათ 73-ზე ნაჩვენებია 16 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის უჯრედშიგა სტიმულაციაზე მიხვევის დინამიკაზე. დენის მასტიმულირებელი იმპულსების თავდაპირველი ამპლიტუდა 0,6 ნა-ს ტოლი იყო. ვხედავთ, რომ ნეირონი ამ სტიმულებს ქმედების პოტენციალებით ვერ პასუხობს. შემდეგ მასტიმულირებელ დენის იმპულსთა ამპლიტუდა აწეულ იქნა 0,7 ნა-მდე. ნეირონმა მათ უპასუხა 5 ქმედების პოტენციალებით და დამყარდა ჰაბიტუაცია- ჩანაწერში შეინიშნება მხოლოდ მცირე მადეპოლარიზებული არტეფაქტები (“კბილები”). ჰაბიტუაციის დადგომიდან 1 წუთსა და 29 წამის შემდეგ მოდებულ იქნა 12 მილიტესლა ამპლიტუდის ცვლადი მაგნიტური ველი- სიხშირით -16 პერცი. 44 წამის განმავლობაში აღსდგა ქმედების პოტენციალების გენერირება, თუმცა შემდეგ ისევ დამყარდა ჰაბიტუაცია.



სურ. 73

16 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველის გავლენა დეჰაბიტუაციაზე.

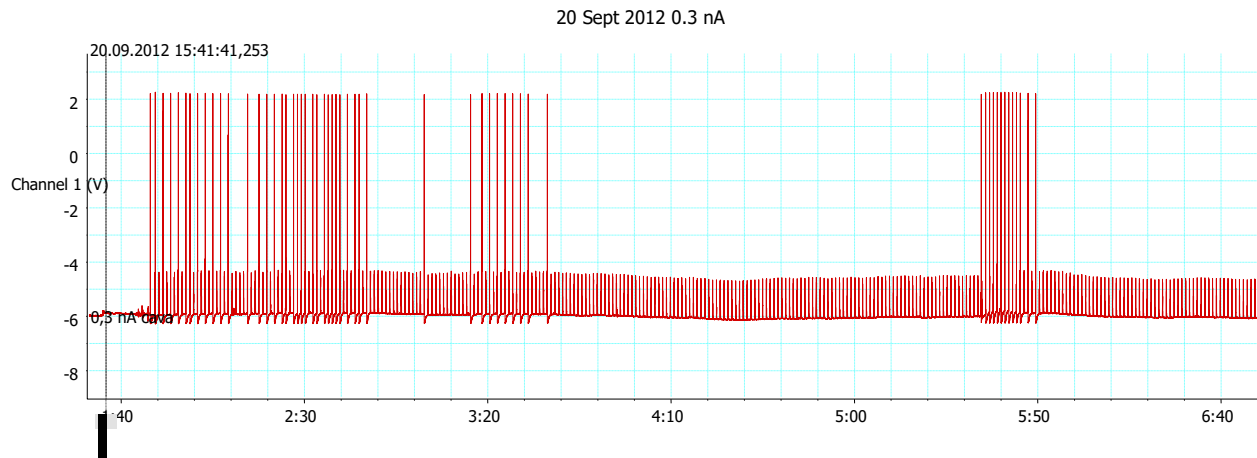
სურათზე 74 ილუსტრირებულია 17 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის ზეგავლენა ნეირონზე. თავდაპირველად სტიმულაცია დაწყებულ იქნა 0,1 ნა ამპლიტუდის სტიმულებით, თუმცა ქმედების პოტენციალები არ აღმოცენებულან. პირველი ქმედების პოტენციალი აღმოცენდა 0,5 ნა სტიმულზე, მაგრამ ამ ერთი ქმედების პოტენციალის გარდა მეტი აღარ გენერირებულა. ამიტომ სტიმულის ამპლიტდა ისევ იქნა გაზრდილი 0,6 ნა-მდე- აღმოცენდა მხოლოდ 2 ქმედების პოტენციალი. ჰაბიტუაციის დასამზერად დაჭირო შეიქმნა სტიმულის ამპლიტუდის გაზრდა 0,7 ნა-მდე. ნეირონმა უპასუხა 5 ქმედების პოტენცილით და შემდეგ დამყარდა ჰაბიტუაცია. სტიმულაცია გაგრძელდა მაგრამ ქმედების პოტენცილები აღარ აღმოცენებულან. ამ ფონზე 51 წამის შემდეგ მოდებულ იქნა 12 მილიტესლა ამპლიტუდის მქონე 17 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველი. ქმედების პოტენციალების გენერირება აღსდგა 10 წამის განმავლობაში და ნეირონმა აღმოაცენა 6 ქმედების პოტენციალი.



სურათი 74.

17 პერცის გავლენა პაბიტუაციაზე

მე-75 სურათზე მოცემულია 18 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის მიერ პაბიტუაციის დარღვევის სურათი, როდესაც ნეირონი მიეჩევიან უჯრედშიგა სტიმულებს. ნეირონი საკამოდ აღზნებადი იყო და ქმედების პოტენციალებით რეგირება მოახდინა უკვე 0,3 ნა ამპლიტუდის მქონე სტიმულებზე. რეაქციები საკმაო ხანს გაგრძელდა-სრულ პაბიტუაციას დაჭირდა 1 წუთი და 51 წამი. ამის შემდეგ თითქმის 2 წუთის განმავლობაში სტიმულაცია არ შეწყვეტილა, მაგრამ რეაქციებში არც ერთი ქმედების პოტენციალი არ ჩანს. ამ ფონზე მოხდა 6 მილიტესლა ამპლიტუდის მქონე მაგნიტური ველის ჩართვა, რასაც მყისიერად მოყვა ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალთა გენერირება- ე.ი. პაბიტუაციის დარღვევა. მაგნიტური ველი ჩართული იყო 14 წამის განმავლობაში. მისი გამორთვისთანავე ნეირონმა შეწყვიტა ქმედების პოტენციალების აღმოცენება.

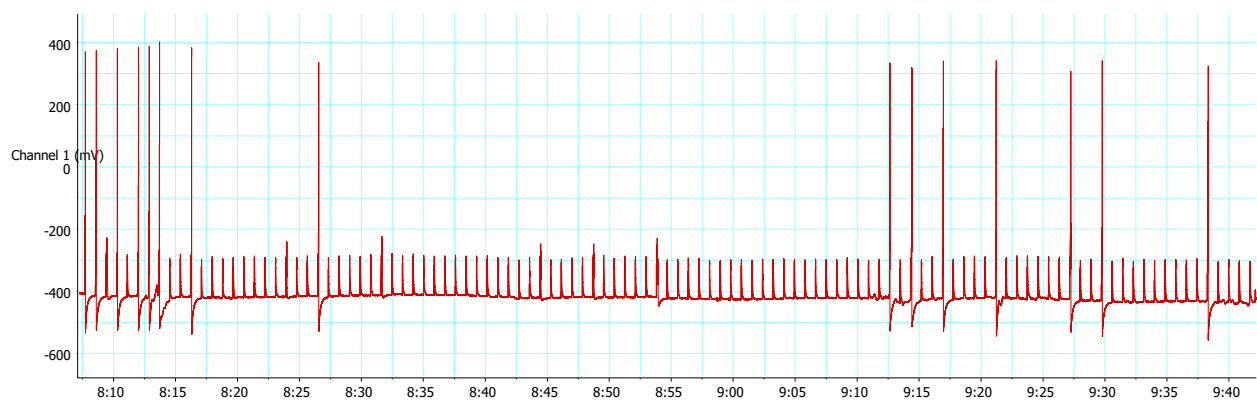


სურ. 75

18 პერცის გაგვლენა ჰაბიტუაციაზე

სურათ 76-ზე ნაჩვენებია 19 პერცი სიხშირის მქონე ცვლადი მაგნიტური ველით დასხივებული ნეირონების მიჩვევის დათრგუნვის სურათი უჯრედშიგა სტიმულაციის მიმართ.

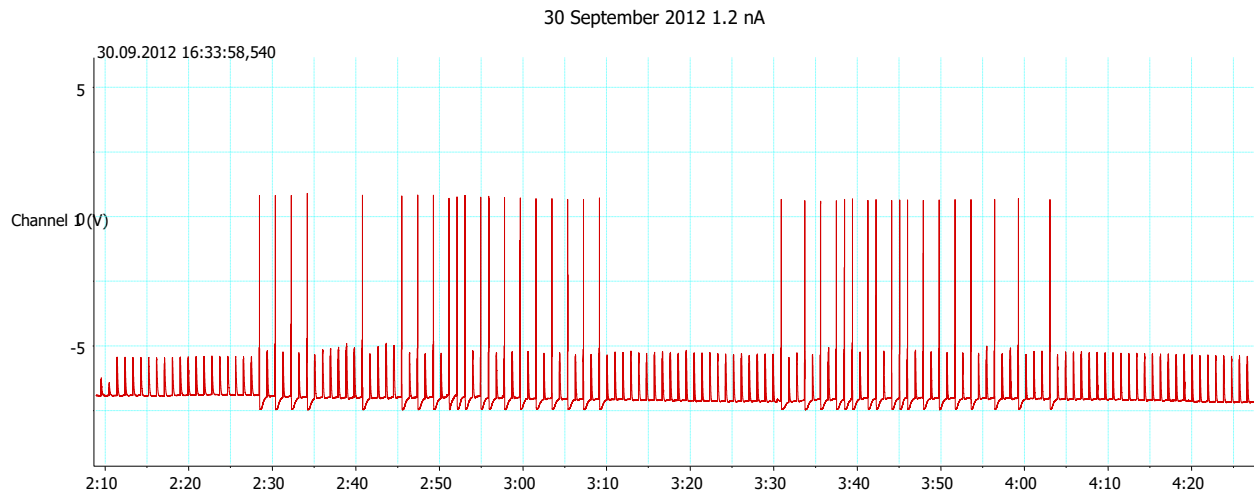
აქ ზღურბლოვანი სტიმულის ამპლიტუდა 0,5 ნა იყო. ნეირონი სტიმულს მიეჩვია 20 წამის შემდეგ. შემდეგ ჩართულ იქნა 19 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველი, რომლის დაძაბულობის ამპლიტუდაა 12 მილიტესლა. დეჰაბიტუაცია აშკარად გამოიკვეთა.



სურ. 76.

19 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედება ნეირონის დეჰაბიტუაციაზე.

უნდა აღინიშნოს რომ დაბალსიხშირული მაგნიტური ველის ზემოქმედება ნეირონზე ხასიათდება დეჰაბიტუაციის ეფექტით, თუმცა ცალკეულ სხვადასხვა სიხშირეების ეფექტები ერთმანეთისაგან თითქმის არ განსხვავდება. ამის მაგალითად გამოდგება 20 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის გაგვლენა ნეირონის დეჰაბიტუაციაზე, რომელიც მსგავსია ყველა დანარჩენი სიხშირეების ეფექტებისა. თავდაპირველად ნეირონის სტიმულაცია მოხდა 0,3 ნა ამპლიტუდის მასტიმულირებელი იმპულსებით, თუმცა ორი ასეთი სტიმულის მიცემამ აშკარა გახდა რომ ეს სიდიდე შორს იყო ზღურბლოვანი მნიშვნელობისაგან, ამიტომ სტიმულის ამპლიტუდა გაეზარდეთ 0,5 ნა-მდე. 17,2 წამის განმავლობაში სტიმულაციამ არ გამოიწვია ქმედების პოტენციალების აღმოცენება, ამის გამო სტიმული ისევ გაეზარდეთ 0,7 ნა-მდე, რაზეც ნეირონმა დაიწყო ქმედების პოტენციალების გენერირება. სტიმულაციის 43-ე წამზე დაწყებულა ჰაბიტუაცია, თუმცა სტიმულაცია არ შეწყვეტილა. ამ ფონზე 20 პერცი სიხშირის (12 მილიტესლა მაქს. დაძაბულობა) მაგნიტური ველის ჩართვამ გამოიწვია ჰაბიტუაციის დარღვევა და ქმედების პოტენციალების გენერირების აღდგენა. ვეილს მოდება გრძელდებოდა 32 წამის განმავლობაში, მისი გამორთვისთანავე აღსდგა ჰაბიტუაციის მდგომარეობა -ის სურ.



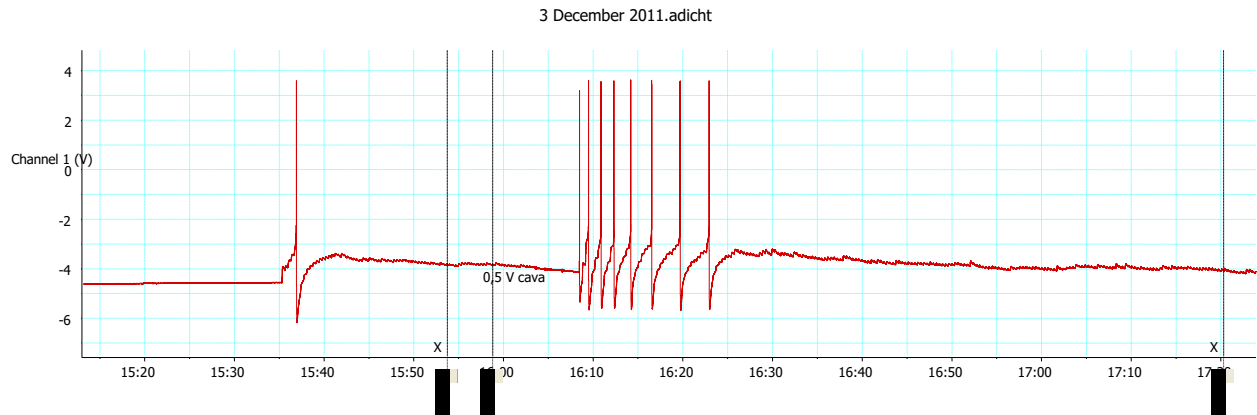
სურ. 77

20 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველის ეფექტი დეჰაბიტუაციაზე. ველის დაძაბულობის მაქსიმალური მნიშვნელობა 12 მილიტესლაა.

სინაფსური სტიმულაცია.

როგორც აღვნიშნეთ, სინაფსური სტიმულაციისათვის ისევე როგორც უჯრედშიგა სტიმულაციისათვის ვიყენებდით დისკრეტულ სტიმულებს. მაგრამ უჯრედშიგა “სტიმული-რეაქცია”-საგან განსხვავებით სინაფსური სტიმულაციის პირობებში შეუძლებელია “ერთი სტიმული-ერთი ქმედების პოტენციალი”-ს ქარგის მქონე რეაქციის მიღება. საქმე ისაა, რომ სინაფსური სტიმულაციისას მასტიმულირებელი ძაბვის იმპულსები მიეწოდება ნერვულ ბოჭკოთა მთელ “შეკერას”, რის გამოც რეაქციები რთული ფორმისაა. აღსანიშნავია რომ განსხვავება დასხივების პირობებში დეჰაბიტუაციის ეფექტების მიმართ არ შეინიშნებოდა. ამის გამო საილუსტრაციოდ მოვიყვანთ მხოლოდ 1 და 5 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის გავლენას სინაფსური მიხვევის დარღვევაზე.

სურათ 78-ზე ვხედავთ, რომ პირველ სტიმულზე ნეირონმა უპასუხა მცირდი დეპოლარიზაციით რასაც მოყვა ერთი ქმედების პოტენციალის აღმოცენება. ჰაბიტუაცია გამოისახა გრადუალური რეპოლარიზაციით და ქმედების პოტენციალების არ არსებობაში. ამ ფონზე 1 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის ჩართვა იწვევს ნეირონის მკვეთრ აღგზნებას და ქმედების პოტენციალთა გენერირებას, თუმცა 8 ქმედების პოტენციალის აღმოცენების შემდეგ ჰაბიტუაცია ისევ აღსდგა.

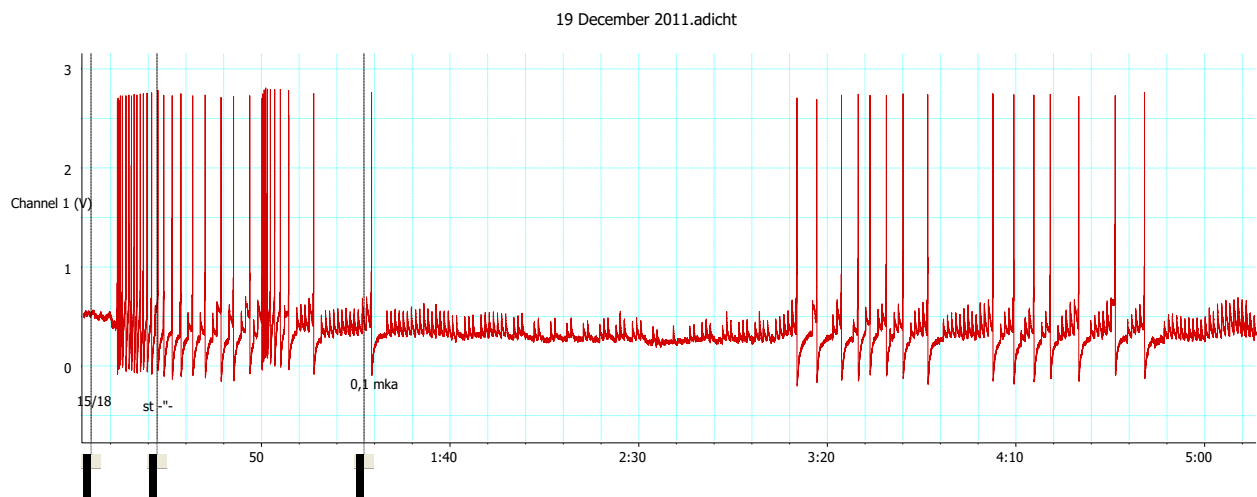


სურ. 78

1 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა სინაფსურ პაბიტუაციაზე.

79-ე სურათზე ნაჩვენებია 5 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა სინაფსურ დეპაბიტუაციაზე. ნეირონის გასადიზიანებლად გამოყენებულ იქნა 0,5 ვოლტი ამპლიტუდის მქონე ძაბვის იმპულსები. ძაბვა მიეწოდებოდა მარცხენა პალიალური ნერვის განშტოებებს შემწოვი ელექტროდებით. განსაზღვრული დროის შემდეგ ქმედების პოტენციალთა აღმოცენება წყდება და სტიმულაციის გაგრძელებას თან ახლავს მხოლოდ აღმგზნები პოსტ სინაფსური პოტენციალები, რომელთა აღმოცენების სიხშირე კლებულობს, რაც მიუთითებს პაბიტუაციის გაღრმავებაზე.

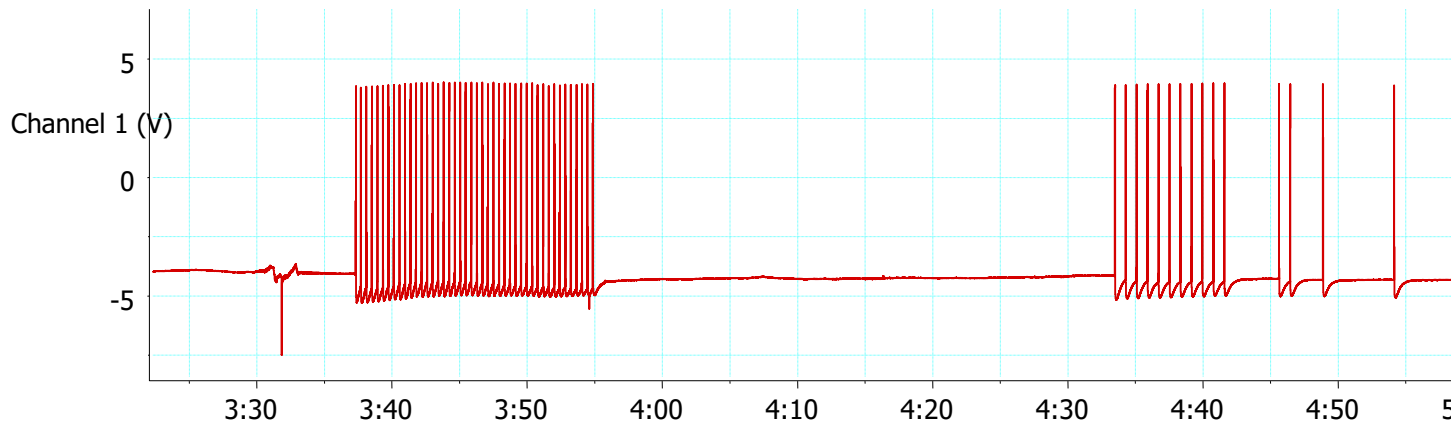
ამ მომენტში 5 პერცი სიხშირის (დაძაბულობა 10 ტესლა) ელექტრომაგნიტური ველის ჩართვა იწვევს ჯერ აღმგზნები პოსტ სინაფსური პოტენციალების გააქტიურებას და ამ ფონზე ქმედების პოტენციალების აღმოცენებას, თუმცა ქმედების პოტენციალები მალევე ქრება და რჩება მხოლოდ აღმგზნები პოსტ სინაფსური პოტენციალები.



სურ. 79.

5 პერცი სისშირიეს ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა სინაფსური პაბიტუაციის დინამიკაზე.

სურათ 80-ზე ვხედავთ, რომ მარცხენა პალიალურ ნერვზე 0,3 V ამპლიტუდის იმპულსების მოდებამ გამოიწვია ნეირონის სინაფსური რეაქციები ქმედების პოტენციალების რიტმულად გენერირების სახით თუმცა მიჩვევა დამყარდა უეცრად 19 წამის შემდეგ. სტიმულაციის გრძელდებოდა თუმცა ჩანაწერში არტეფაქტები არ ჩანს რადგან სტიმულაცია არაა უჯრედსშიგა. მიჩვევიდან 38 წამის შემდეგ ჩართულ იქნა 10 მილიტესლა დაძაბულობის 6 პერცი სისშირის ელექტრომაგნიტური ველი. ნეირონის რეაქციები ქმედების პოტენციალების სახით აღსდგა 9 წამის განმავლობაში ისევ რიტმულად, ოღონდ ნაკლები სისშირით ვიდრე საწყის მდგომარეობაში, შემდეგ 8 წამის განმავლობაში კიდევ აღმოცენდა 3 ქმედების პოტენციალი და მიჩვევა ისევ დამყარდა.

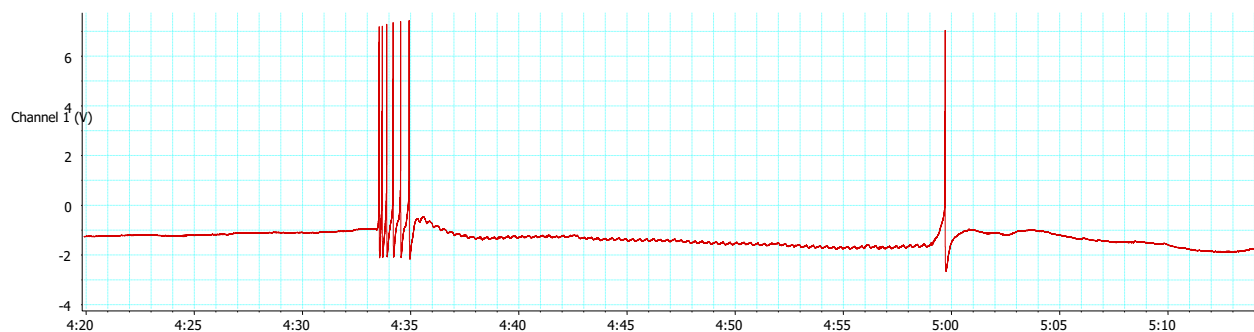


სურ. 80

6 პერცი სისშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა სინაფსურ პაბიტუაციის დარღვევასა და აღდგენაზე.

81-ე სურათზე ნაჩვენებია 8 პერცი სისშირის ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა სინაფსურ დეპაბიტუაციაზე. ნეირონის გასადიზიანებლად გამოყენებულ იქნა 0,5 ვოლტი ამპლიტუდის მქონე ძაბვის იმპულსებს. ძაბვა მიეწოდებოდა მარცხენა პალიალური ნერვის განშტოებებს შემწოვი ელექტროდებით. ნეირონის სინაფსურ გაღიზიანებაზე რეაქცია გამოიხატა 26 მილივოლტი ამპლიტუდის მქონე 3 წამი ხანგრძლივობის დეპოლარიზაციით რაზეც 6 ქმედების პოტენციალის აღმოცენდა. რის შემდეგ დამყარდა მიჩვევა. ჩანაწერში მოჩანს მხოლოდ მცირე ამპლიტუდის აღმგზნები პოსტსინაფსური პოტენციალები. პაბიტუაციის დადგომიდან 26 წამის შემდეგ ნეირონი დაექვემდებარა 8 პერცი სისშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედებას. ველის

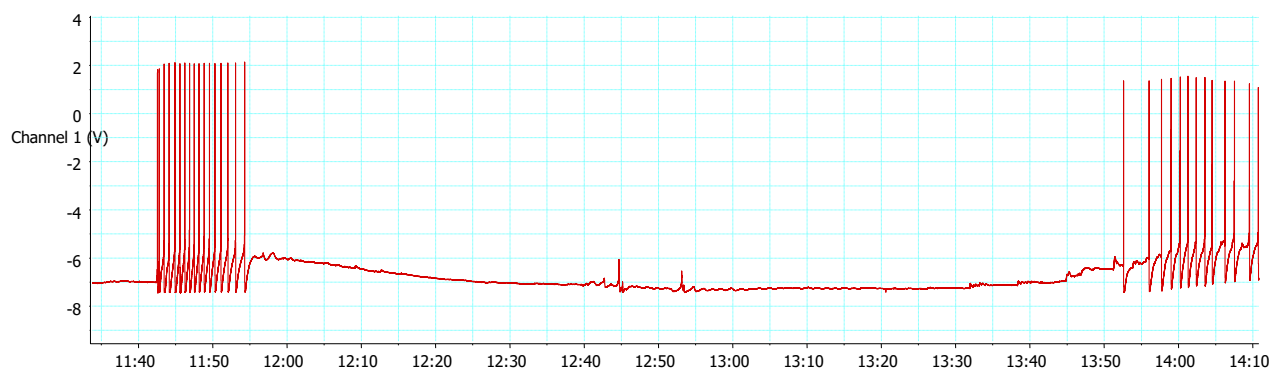
დაძაბულობა 10 მილიტესლა. გამოიკვეთა 19 მილივოლტის დეპოლარიზაცია მასზედ 1 ქმედების პოტენციალით.



სურ. 81.

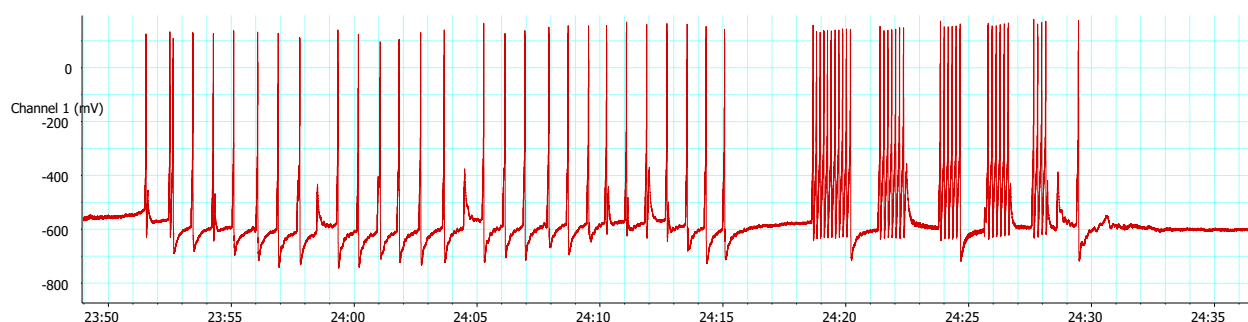
8 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველის (10 მილი ტესლა) გავლენა ნეირონის პაბიტუაციის დინამიკაზე.

სურათ 82-ზე ილუსტრირებულია 10 პერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის რეაქციებზე და მიწვევა- დეპაბიტუაციაზე. ნეირონის სინფასური სტიმულაცია ხდებოდა 0,4 ვოლტი ამპლიტუდის ძაბვის იმპულსებით. რეაქცია ქმედების პოტენციალების გენერირებით გაგრძელდა 13 წამის განმავლობაში, რის შემდეგაც გამოიკვეთა პაბიტუაცია ხნაგრძლივი 15 მილივოლტის ამპიტუდის მქონე პიპერპოლარიზაციით. მიწვევიდან 2 წუთის შემდეგ ჩართულ იქნა 10 პერცისიხშირის 10 მილიტესლა დაძაბულობის ელექტრომაგნიტური ველი. გამოიკვეთა 9,4 მილივოლტის დეპოლარიზაცია და აღსდგა ქმედების პოტენციალები, ოღონდ ნაკლები სიხშირით.



სურათი 82. 10 პერცი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ველში ნეირონის მოთავსება იწვევს ნეირონის დეპოლარიზაციას და არღვევს დამყარებულ პაბიტუაციას.

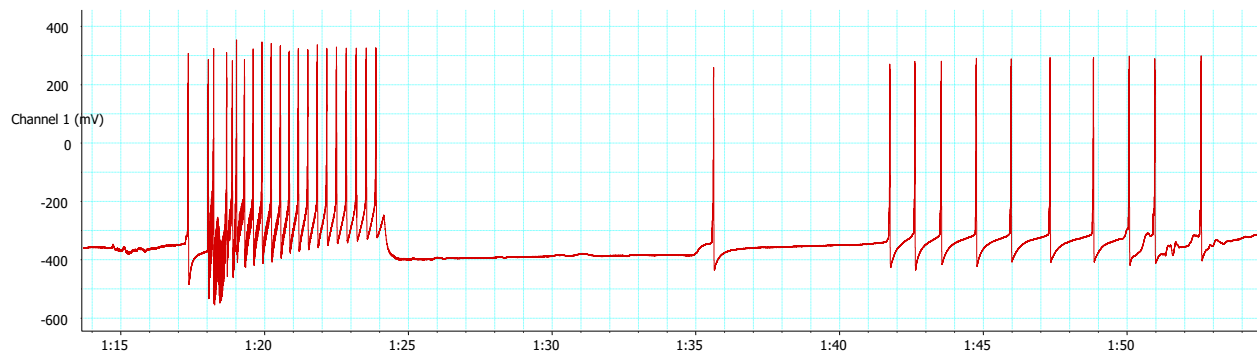
სურათ 83-ზე ვხედავთ, რომ მარცხენა პალიადურ ნერვზე 0,3 V ამპლიტუდის იმპულსების მოდებამ გამოიწვია ნეირონის სინაფსური რეაქციები ქმედების პოტენციალების რიტმულად გენერირების სახით თუმცა მიხვევა დამყარდა 24 წამის შემდეგ. სტიმულაციის გრძელდებოდა თუმცა ჩანაწერში არტეფაქტები არ ჩანს რადგან სტიმულაცია არაა უჯრედსშიგა. ამ მომენტში მოხდა 14 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის პერიოდული ჩართვა ჰელმჰოლცის კოჭებს შუა არეში. მაგნიტური ველის მოდების თითოეულ მომენტში აღინიშნება ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალების აღმოცენება ჯგუფების სახით. საინტერესოა ის გარემოება, რომ როდესაც მაგნიტური ველი გამორთულია ნეირონი არ გენერირებს ქმედების პოტენციალებს. ამრიგად აშკარაა, რომ მაგნიტური ველი თრგუნავს ჰაბიტუაციას მოდების დროის განმავლობაში.



სურ. 83

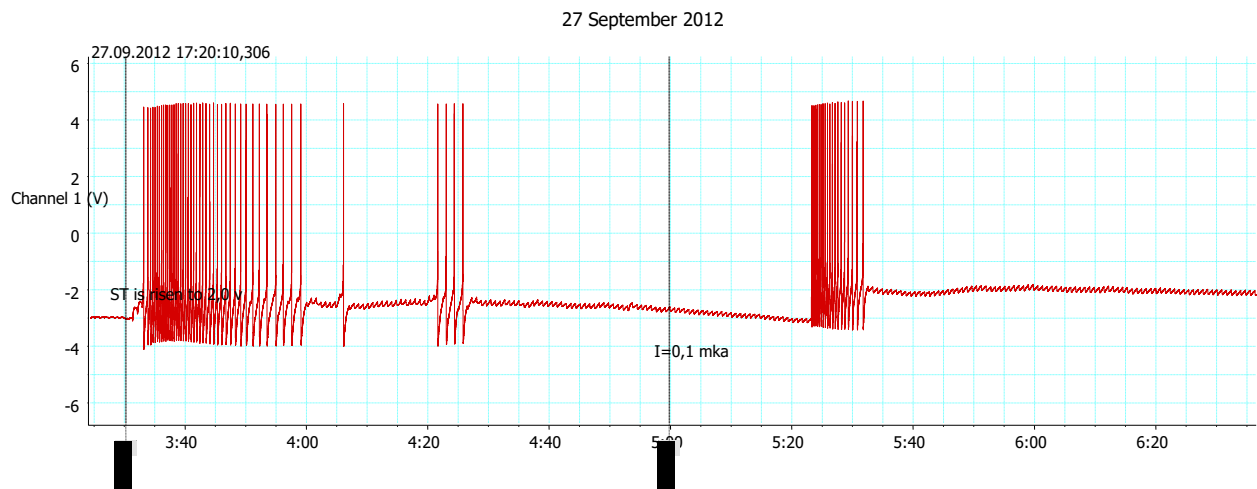
23:52 მომენტიდან დაიწყო სინაფსური სტიმულაცია. 24:15-ზე დამყარდა ჰაბიტუაცია. 24:18-დან 24:30 მდე 6-ჯერ იქნა მოდებული მაგნიტური ველი, რომლის სიხშირეა 14 პერცი, ხოლო ამპლიტუდა შეადგენს 10 მილიტესლას. მაგნიტური ველის თითოეული მოდება იწვევს ჰაბიტუაციის დათრგუნვას და ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალთა გენერირებას.

სურათ 84-ზე ილუსტრირებულია 16 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის გავლენა ნეირონის რეაქციებზე და მიხვევა- დეჰაბიტუაციაზე სინაფსური სტიმულაციის მიმართ. 1:17- 1:24 წამების განმავლობაში ნეირონი მიეჩვია სინაფსურ სტიმულაციას. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 11 წამის შემდეგ მოდებულ იქნა 16 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველი. თავდაპირველად ნეირონმა უპასუხა მხოლოდ ერთი ქმედების პოტენციალით, თუმცა 6 წამის შემდეგ იგი “ამუშავდა” და არარიტმულად დაიწყო ქმედების პოტენციალების გენერირება.



სურ. 84. 16 პერცი სიხშირის ცვლადი მაგნიტური ველის გავლენა დეჰაბიტუაციაზე.

სურათ 85-ზე ვხედავთ, რომ მარცხენა პალიალურ ნერვზე 2 V ამპლიტუდის იმპულსების მოდებამ გამოიწვია ნეირონის სინაფსური რეაქციები ქმედების პოტენციალების გენერირების სახით. თავდაპირველად რეაქცია ძლიერია მაგრამ შინიშნება რეაქციის თანდათანობითი მიღევა და ჰაბიტუაციის დამყარება. ჩანაწერში ვხედავთ მხოლოდ აღმზნებ პოსტსინაფსურ პოტენციალებს რომლებიც “კბილანების” სახით დაიმზირება ჩანაწერში. ჰაბიტუაციის დადგომიდან 1 წუთის შემდეგ მოხდა მოხდა 18 პერცი სიხშირის მქონე მაგნიტური ველის ჩართვა ჰელმჰოლცის კოჭებში. მაგნიტური ველის მოდების განმავლობაში აღინიშნება ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალების აღმოცენება რომელთა სიხშირე მიღევადია. ამრიგად აშკარაა, რომ მაგნიტური ველი თრგუნავს ჰაბიტუაციას მოდების დროის განმავლობაში.

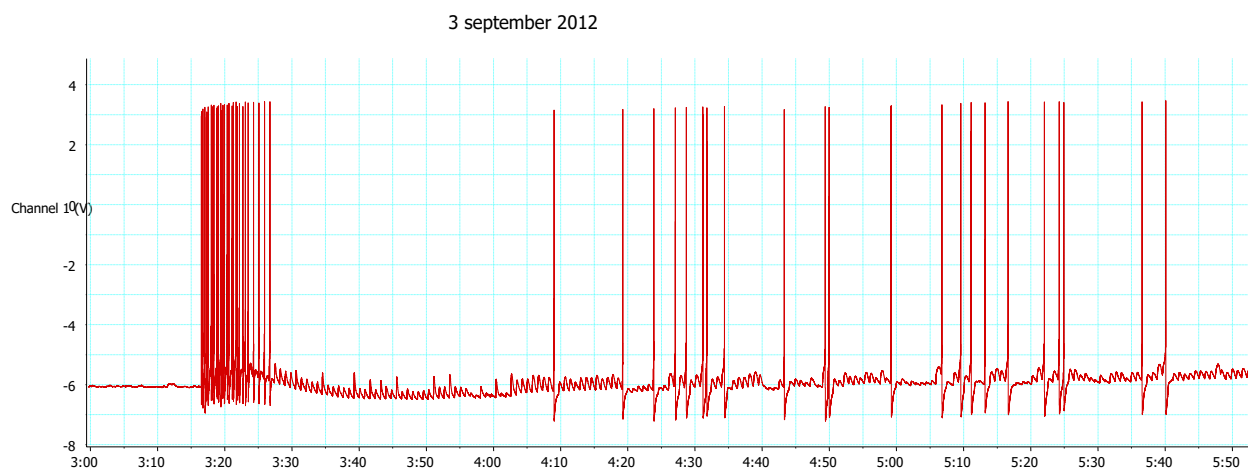


სურათი 85.

18 პერცი სიხშირის მაგნიტური ველის გავლენა სინაფსურ დეჰაბიტუაციაზე.

სურ. 86-ზე ვხედავთ 20 ჰერცი სიხშირის მაგნიტური ველის გავლენას სინაფსური პაბიტუაციის დარღვევაზე. სტიმულის ამპლიტუდა არის 1 ვ. ნეირონი პასუხობს ქმედების პოტენციალების სერიით და ყალიბდება პაბიტუაცია. რეაქციაში შეინიშნება მხოლოდ სხვადასხვა ამპლიტუდის მქონე აღმგზნები პოსტსინაფსური პოტენციალები. პაბიტუაციის დადგომიდან 40 წამის შემდეგ ჩაერთო 19 ჰერცი სიხშირის ცვლადი მაგნიტური ველი 15 მილიტესლა ამპლიტუდით. მაგნიტური ველის ჩართვას მოყვა ნეირონის მიერ ქმედების პოტენციალების გენერირება არარეგულარული სიხშირით.

დეპაბიტუაცია



სურ. 86.

20 ჰერცი სიხშირის მაგნიტური ველის გავლენა სინაფსური პაბიტუაციის დარღვევაზე.

შედეგი

1-20 ჰერცი სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ველის ეფექტები ნეირონზე გამოიხატება პაბიტუაციის დარღვევაში. ეფექტები ერთმანეთის მსგავსია და მათ შორის რაიმე მნიშვნელოვანი გასხვავება არ შეიმჩნევა. პაბიტუაციის დარღვევა შეინიშნება როგორ უჯრედშიგა ასევე სინაფსური სტიმულაციის მიმართ.

ხანგრძლივი განმეორებითი ექსპოზიციის ნეირონზე ზემოქმედება

მე-12 კვარტლის ამოცანათა მიზანი იყო შეგვესწავლა ხანგრძლივი განმეორებითი ექსპოზიციის ნეირონზე ზემოქმედების კვლევა აკუმულირების ეფექტების გამოვლენისათვის. ამ მიზნით ექსპერიმენტები შემდეგნაირად იქნა ორგანიზებული: საკვლევი ცხოველები თავსდებოდნენ TE Cell-ში და ხდებოდა მათი ემგ დასხივება ყოველდღიურად 3-3 საათის განმავლობაში. ცხოველთა განლაგება და

ადგილმდებარეობა განიცდიდა ვარირებას. სათანადოდ ხდებოდა მათი აღრიცხვა. იხ. სურ.87.



სურ. 87 ცხოველების განლაგება TEM CELL-ში.

შთანთქმის კუთრი თანრიგის (SAR)-ის გამოთვლა ხდებოდა ცალკეული ცხოველისათვის. ამ მიზნით შემუშავებულ იქნა ცხოველის მოდელი. მოდელი გულისხმობს როგორც გარსის ასევე მისი კუნთოვანი ნაწილის და ნერვული სიტემის შესაბამისი ელექტრული პარამეტრების განთავსებას სათანადო ადგილებზე. ამის შემდეგ ხდებოდა FDTD მეთოდის საშუალებით SAR -ის გამოთვლა. ტემპერატურის ნაზრდის გამოთვლა არ ხდებოდა იმ მარტივი მიზეზის გამო, რომ დასხივების დამთავრების შემდეგ ცხოველი იღებდა გარემო ტემპერატურას (მისი ცივ სისხლიანობის გამო). დასხივებისათვის გამოიყენებოდა გენერატორის მაქსიმალური სიმძლავრე 10 ვატი.

დასხივების პერიოდში დასხივების სიანის შემდეგ ხდებოდა ცხოველების ქცევაზე დაკვირვება. შესასწავლ პარამეტრებიდან გამოყოფილ იქნა მათი რეაქციების დროები ტაქტილურ შეხებაზე, მათი რეაქციები საკვების მიღებაზე და შეწყვილებაზე. იმის გამო, რომ აღნიშნული ცხოველები არიან ე.წ. ღამის ცხოველები, ისინი თავსდებოდნენ ბნელ კამერაში. დაკვირვება ხდებოდა ინფრაწითელი CCD კამერის საშუალებით, ამასთანავე ხდებოდა მათი ქცევის გადაღება ამავე კამერით მონაცემების შემდგომი დამუშავების მიზნით.

შედეგები:

დაკვირვებამ გვაჩვენა, რომ ხანგრძლივი დახივების შემდეგ საკვლევ ცხოველებს შეუსუსტდათ თავდაცვის რეფლექსი. დახივებული ცხოველების მოძრაობა და გადაადგილება უფრო სწრაფია, რაც მათ აღზებადობის გაზრდაზე მიუთითებს. თავდაცვის რეფლექსის გაზომვა შემდეგნაირად ხდებოდა: ვაკვირდებოდით ცხოველის მიერ საცეცის საშუალებით დაბრკოლების შეხებას და ვზომავდით დროის ინტერვალს რომელიც საჭიროა, რათა ამ შეხების შემდეგ მოხდეს დაბრკოლებიდან საცეცის მოცილება და შეკუმშვა. მიიღებოდა გაზომილ რიცხვთა ორი ნაკადი.

გამოყენებულ იქნა მათემატიკური მოდელი, რომლის სახელწოდებაცაა “რიცხვითი მწკრივები წრფივი ტრენდით”. თავდაცვის რეფლექსის მათემატიკური მოდელად აღებული იქნა

$$Y(t)=a+bt+\varepsilon \quad (1)$$

აქ $Y(t)$ არის დროის ინტერვალში, რომელიც შეესაბამება თავდაცვის რეფლექსის გამოვილინებისას საცეცის შეხებიდან მისი მოცილების დრომდე, t – არის შეხებათა რიცხვი, a და b არიან მუდმივი პარამეტრები, ხოლო $\varepsilon(t)$ წარმოადგენს კომპონენტს ნულოვან მათემატიკური ლოდინით. ექსპერიმენტები ჩატარდა 52 ცხოველზე, შესაბამისად დროები გაიზომა 52-ვე ცხოველისათვის. ფორმულა (1)-დან გამომდინარეობს, რომ i -ური სერიისათვის ჩაიწეროს, რომ

$$Y_i(t) = a_i^* + b_i^* t + \varepsilon_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 32$$

სადაც a_i^* და b_i^* წარმოადგენენ სტატისტიკურ მოლოდინებს უცნობი a და b – კოეფიციენტებისათვის.

პირველადშერჩეული მოდელის ადექვატურობა უნდა შემოწმდეს სტატისტიკურად. მოდით შემოვიღოთ აღნიშვნები $X(t) = a + bt$ წრფივი ტრენდისათვის. შესაბამისად დამზერილ i -ურ მონაცემებისათვის გვექნება.

$$X_i^*(t) = a_i^* + b_i^* t, \quad i = 1, 2, \dots, 32$$

განვიხილოდთ სხვაობა $\varepsilon(t) = Y(t) - X(t)$ რათა შემოწმდეს მოდელის ადექვატურობა. ამასთანავე წარმოვადგინოთ რომ:

$$H_0 \ E\varepsilon(t)=0 \quad (\text{მთავარი ჰიპოთეზა})$$

$$H_1 \ E\varepsilon(t) \neq 0 \quad (\text{ალტერნატიული ჰიპოთეზა}).$$

აქ $E\varepsilon(t)$ არიოს მათემატიკური მოლოდინი t – თვის.

ჩვეთვალთ, რომ სხვაობა ტოლია $\varepsilon_i^*(t) = Y_i(t) - X_i^*(t)$, $t = 1, 2, \dots, m_i$ და არითმეტიკული საშუალო მიიღება სხვაობით $\bar{\varepsilon}_i^* = \frac{1}{m_i} \sum_{t=1}^{m_i} \varepsilon_i^*(t)$ თითოეული i -ური გაზომვისათვის.

ამრიგად მივიღებთ სტატისტიკებს $\bar{\varepsilon}_2^*, \dots, \bar{\varepsilon}_{32}^*$.

განვიხილოთ სტატისტიკა $T = \frac{\bar{\varepsilon}^*}{s} \sqrt{52}$ ასროგორც კრიტერიუმი ე.წ. t -სტატისტიკა.

გამოვიყენოთ ნორმალური განაწილების ცხრილი, რადგანაც გაზომვათა რიცხვი შეადგენს 52. შესაბამისი გაზომვები გვიჩვენებენ, რომ t -ის რიცხვითი მნიშვნელობა დაახლოებით უდრის 0,100 ხოლო P value დაახლოებით ტოლია 0,856.

აშკარაა, რომ P value არის საკმაოდ დიდი. მაშ შეგვიძლია ვთქვათ რომ არ გაგვაჩნია საფუძველი რათა უარყოთ ჰიპოთეზა H_0 . ეს თავის მხრივ ნიშნავს, რომ ზემოტ მოცემული მათემატიკური მოდელის არება სწორია.

ესხლა მოვახდინოთ სტატისტიკური ჰიპოთეზის შემოწმება, რათა დავამტკიცოთ, რომ გვაქვს მზარდი ტრენდი.

გამოვითვალოთ b_i^* უცნობი b კოეფიციენტისათვის (2) –ის გამოყენებით:

შედგად მიიღება სტატისტიკები $b_1^*, b_2^*, \dots, b_{52}^*$. უნა შემოწმდეს ჰიპოთეზები

$H_0: b = 0$ (ძირითადი ჰიპოთეზა)

$H_1: b > 0$ (ალტერნატიული ჰიპოთეზა)

უნდა გამოვითვალოთ სტატისტიკის რიცხვითი მნიშვნელობა

გამოთვლებმა გვიჩვენეს, რომ at სტატისტიკისა $-s$ რიცხვითი მნიშვნელობა დაახლოებით 2,77 ტოლია ხოლო P value დაახლოებით ტოლია 0.003.

აშკარაა, H_0 რომ უნდა უარყოთ და მივიღოთ H_1 ჰიპოთეზა. ამრიგად სტატისტიკურმა ანალიზმა დაადასტურა, რომ რომ ხანგრძლივი დახივების შემდეგ საკვლევ ცხოველებს შეუსუსტდათ თავდაცვის რეფლექსი.

ამ დაკვირვებების გარდა ექსპერიმენტები ტარდებოდა საკონტროლო და სახივეებულ ცხოველების იზოლორებულ ნერვულ სისტემებსა და იდენტიფიცირებულ ნეირონებზე.

ელექტროფიზიოლოგია

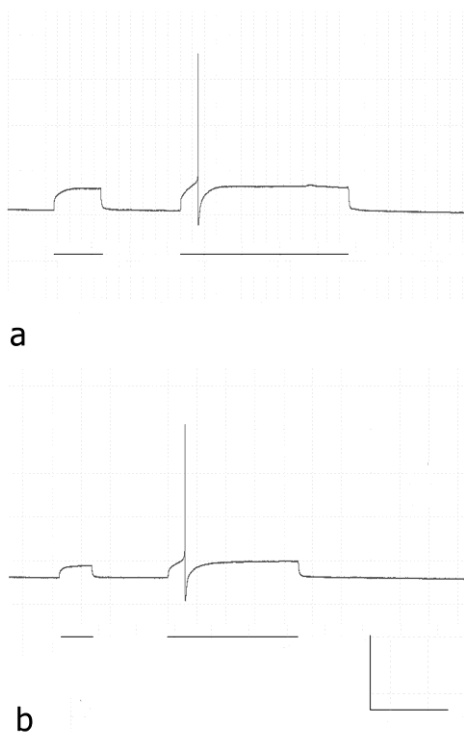
დასხივების სერიის დამთავრების შემდეგ ადგილი ჰქონდა აღნიშნული ცხოველებიდან ნერვული განგლიების ამოკეთას და იდენტიფიცირებული ნეირონების შესწავლას. მიზანი იყო შედარებულ ყოფილიყო ნეირონის ფუნქციონირებები დასხივებისა და

საკონტროლო პირობებში. შესადარებელ პარამეტრებად აღებულ იქნა ნეირონის აღგზნებადობა- ქმედების პოტენციალის გენერაციის ზღურბლი და პაბიტუაციისათვის საჭირო დრო, რაც ნეირონის მიერ იფორმაციის შენახვისათვის საჭირო დროს წარმოადგენს.

ნეირონის სტიმულაციისათვის გამოიყენებოდა უჯრედშიგა დენი, რომლის გასატარებლად ვიყენებდით ამერიკული წარმოების ხესაწყოს Pikoamersourcr K251A .

ნეირონი როგორც სხვა ბიოლოგიური ობიექტი ვარიაბელურია. სტიმულის ზღურბლი თავისუფლად ცვლადს წარმოადგენს. მისი მათემატიკური მოლოდინი უცნობია. ამის გამო ჩვენ გამოვიყენებთ 95%-იანი სანდოობის ინტერვალი ზღურბლებისათვის. ეს არის ის ინტერვალი რომელშიც 95% ალბათობით ჩავარდება ზღურბლის მნიშვნელობა. ცხადია გამოთვლები ტარდებოდა როგორც დასხივებულ ისევე საკონტროლო ნეირონებზე. ცხადია გამოთვლები ეფუძნებოდა ექსპერიმენტის მონაცემებს. მიღებულ იქნა რომ ეს ინტერვალები ტოლია 0,21ნა-0,38 ნა საკონტროლო ნეირონებისათვის, ხოლო დასხივებულ ნეირონებისათვის ამ ინტერვალმა მიიღო მნიშვნელობა 0,11-0,19 ნა. აშკარაა რომ ეს ინტერვალები არ გადაფარავენ ერთმანეთს. ეს ნიშნავს იმას, რომ ზღურბლის საშუალო მნიშვნელობა დასხივებული ნეირონებისათვის ნაკლებია ვიდრე საკონტროლო ნეირონებისათვის.

სურათ 88-ზე ნაჩვენებია ეს მოვლენა.



სურ. 88

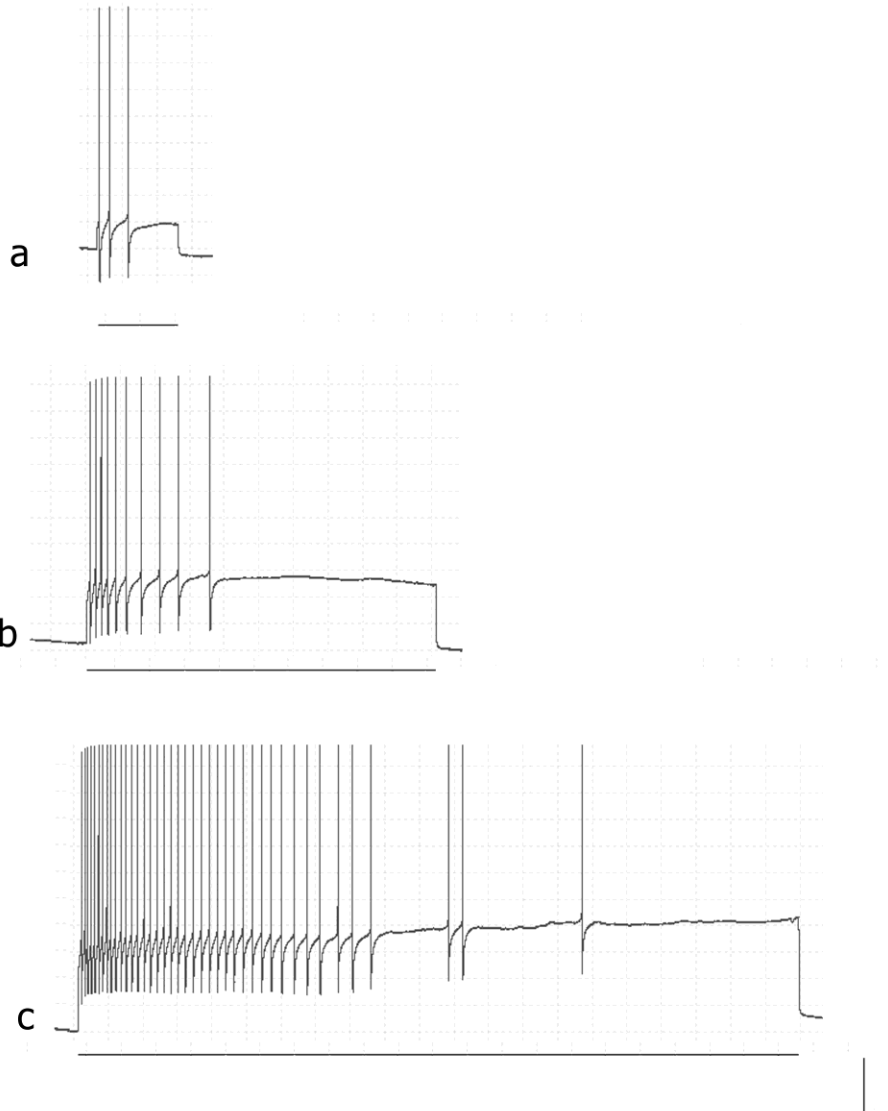
a გვიჩვენებს საკონტროლო ნეირონის ჩანაწერს. პირველი სტიმული 0,2 ნა ტოლია და იგი ზღურბლს ქვედა-არ იწვევს ქმედების პოტენციალის აღმოცენებას. მეორე სტიმილის ამპლიტუდა 0,3 ნა ტოლია და ვარდება იგი 95% ალბათობიან ინტერვალში

0,216ა-0,38 ნა. ამ სტიმულმა გამოიწვია ქმედების პოტენციალის აღმოცენება და იგი წარმოადგენს ზღურბლოვან სტიმულს.

ბ- ზე ვხედავთ დასხივებული ნეირონის რეაქციებს სტიმულზე. პირველი სტიმული ზღურბლს ქვედაა და მისი ამპლიტუდა 0,05 ნა ტოლია. მეორე სტიმულის ამპლიტუდა 0,15 ნა-ს უდრის და იგი ვარდება იგი 95% ალბათობიან ინტერვალში 0,116ა-0,19 ნა. ამ სტიმულმა გამოიწვია ქმედების პოტენციალის აღმოცენება და იგი წარმოადგენს ზღურბლოვან სტიმულს. სტიმულაციის ხანგრძლივობა ნაჩვენებია ოსცილოარმოს ქვეშ უწყვეტი ხაზებით. კალიბრება 25 მვ 1 წმ. ამ შედეგის $p < 0.001$.

ცხადია, რომ ჰაბიტუაციასა და ინფორმაციის შენახვაზე შეგვიძლია ვიმსჯელოთ როდესაც ნეირონი სტიმულს უპასუხებს რამოდენიმე ქმედების პოტენციალით.

სურათ 89-ზე ნაჩვენებია არადასხივებული ნეირონის რეაქციები ზღურბლს ზედა სხვადასხვა ამპლიტუდის სტიმულზეზე. ვხედავთ რომ რაც მეტია სტიმულის ამპლიტუდა მით ხანგრძლივია რეაქცია და მით მეტ ქმედების პოტენციალებს გენერირებს ნეირონი, შესამაბისად იზრდება ჰაბიტუაციისათვის სჭირო დრო.

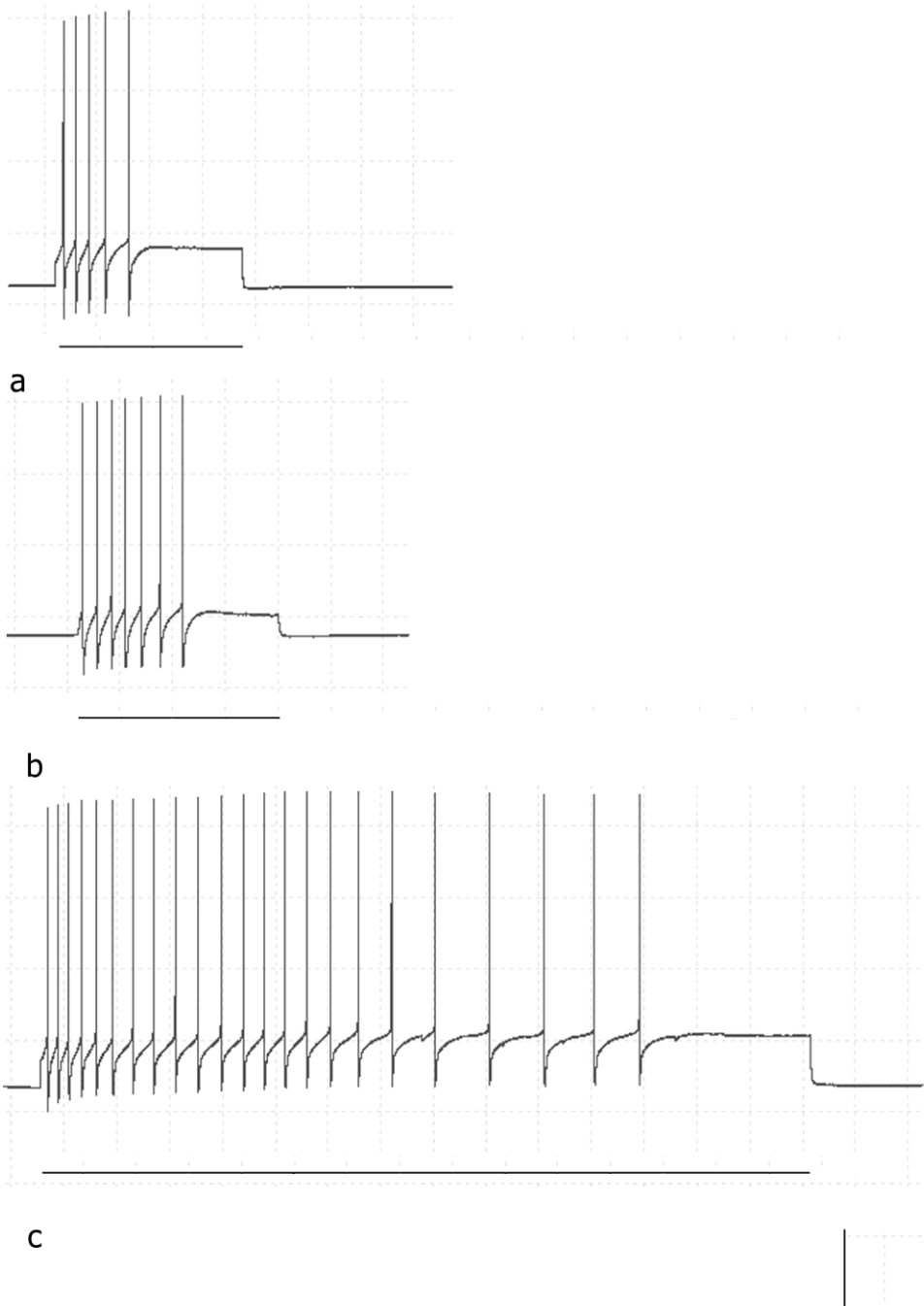


სურ. 89.

a სტიმულის ამპლიტუდა 0,5 ნა ტოლია. b- 1ნა, c 2 ნა.

ნეირონის რეაქციები ნებისმიერი სტიმულის, და კერძოდ უჯრედშიგა სტიმულაციის მიართ არ არის დეტერმინისტული. სტიმული მინიმალური მნიშვნელობა, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს პაბიტუაციის ეფექტი აგრეთვე წარმოადგენს თავისუფალ ცვლადს. ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით გამოთვლებმა გვიჩვენეს ამ ცვლადის საშუალო მნიშვნელობა 95%-იანი ალბათობით ვარდება ინტერვალში 0,423ნა-0,56 ნა საკონტროლო ნეირონებისათვის. დასხივებული ნეირონებისათვის 95% ინტერვალი მოიცავდა 0,19ნა-0,35 ნა. ვხედავთ, რომ ამ შემთხვევაშიც არ გვაქვს ინტერვალების გადაფარვა. სათანადო სტატისტიკურმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ დასივებულ ნეურონს მიჩნენვისთვის სჭირდება გაცილებით ნაკლები სტიმული ვიდრე

საკონტროლო ნეირონს - $p < 0.003$. ეს მოვლენა ილუსტრირებული სურათზე



90.

სურ.90

a საკონტროლო ნეირონი სტიმულირდება სტიმულით 0,5 ნა. ეს მნიშვნელობა ვარდება 95% სანდოობის ინტერვალში რომელიც ტოლია 0,42-0,56 ნა.

b- დასივებელი ნეირონის რეაქციები სტიმულზე რომლის ამპლიტუდა 0,2 ნა ტოლია (ნაკლებია ვიდრე 0,5 ნა). დასივებელი ნეირონისათვის 95% სანდოობის ინტერვალი ტოლია 0,1906- 0,35 ნა.

c – იგივე ნეირონის სტიმულაცია 0,5 ნა რომელიც საკონტროლოსთვის იყო საჭირო. რეაქციების დროის გაზრდა აშკარაა.

ამრიგად, როდესაც დასივებელი ნეირონი სტიმულირდება იგივე სტიმულით რაც დაუსივებელი (საკონტროლო) მას გაცილებით მეტი დრო ჭირდება ჰაბიტუაციისათვის ვიდრე საკონტროლო ნეურონს.

დასკვნები:

GSM- 1800 ში გამოყენებული რადიოსიხშირის ელექტრომაგნიტური ველების ზემოქმედება ცალკეულ ნეირონზე იწვევენ:

- ნეირონის აღგზნებადობის დონის გაზრდას,
- სტიმულის მიმართ ნეირონის რეაქციების გაძლიერებას,
- ჰაბიტუაციისათვის საჭირო დროის გახანგრძლივებას,
- ნეირონის მიერ ინფორმაციის გადამუშავებისადა შენახვისათვის საჭირო დროის გაზრდას. აღნიშნული შედეგები ვლინდება როგორც უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ველებისათვის, ასევე მოდულირებულიათვის. მოდულირებული ველების ზემოქმედება ოდნავ აღემატება ეფექტით უწყვეტ ველებს. ზემოქმედება არ არის დამოკიდებული უწყვეტი ველის მოდულაციის სიხშირეზე.
- მოდულაციისათვის გამოყენებული უაღრესად დაბალი ველები 1-20 ჰერცი იწვევენ ნეირონის ჰაბიტუაციის დარღვევას ველის ზემოქმედების განმავლობაში. რაიმე განსხვავება 1-20 ჰერცის სიხშირის უაღრესად დაბალი ველების ეფექტებს შორის არ შეინიშნება.

პუბლიკაციები:

პროექტის ფარგლებში განხორციელებული სამუშაოები აისახა ორ სამეცნიერო სტატიაში, რომლებიც გამოქვეყნდა იმაქტ ფაქტორის მქონე საერთაშორისო ჟურნალში (აშშ). შედეგები აგრეთვე მოხსენდა 4 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციას და აისახა მათ მასალებში. ამ კონფერენციებიდან 3 ჩატარდა საზღვარგარეთ ხოლო 1 საქართველოში.

სტატიები:

1. <http://informahealthcare.com/toc/ebm/0/0>

Effect of high SARs produced by cell phone like radiofrequency fields on mollusk single neuron

B. Partsvania, T. Sulaberidze, L. Shoshiashvili

Electromagnetic Biology and Medicine ნაბეჭდი გამოცემა დეკემბერში

2. Acute Effect of Exposure of Mollusk Single Neuron to 900-MHz Mobile Phone Radiation

B. Partsvania, T. Sulaberidze, L. Shoshiashvili & Z. Modebadze

Electromagnetic Biology and Medicine 2011, V30 #3, pp170-179

საერთაშორისო კონფერენციები:

1. Influence of radiofrequency EMF short term exposure on neuron habituation to intracellular stimulation

Besarion Partsvaniaa, Levan Shoshiashvilia Tamz Sulaberidzea, Zurab Modebadzea

6th international workshop on biological effect of electromagnetic fields, Turqyi, Bodrum,

2010. ელექტრონული მისამართია

<http://www.istanbul.edu.tr/6internatwshopbioeffemf/cd/index.html>

2. Investigation into influence of high SAR on neuron excitability.

Besarion Partsvania, Tamaz Sulaberidze, Levan Shoshiashvili

ICNIRP 7th International NIR Workshop 2012, UK, Edinburg,

www.icnirp.de/NIR2012/NIR2012.htm

3. Should Peak spatial SARs be considered in guidelines for EMS exposure limits?

Besarion Partsvania, Tamaz Sulaberidze, Levan Shoshiashvili 7th international workshop on biological effect of electromagnetic fields, <http://www.um.edu.mt/events/emf2012>.

4. Effect of exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation on mollusk single neuron

Partsvania B.B., Shoshiashvili L.S.

საერთაშორისო კონფერენცია “ნეირობიოლოგიის აქტუალური საკითხები”
თბილისი, 9-11 დეკემბერი 2011წ.