

```
-- AdaptiveMCH | "class for handling adaptive mechsism in neuron model"
```

```
__ NeuronModel |  
|             |  
|             |__ LIF |  
|             |    |__ ALIF  
|             |  
|             |__ ELIF |  
|             |    |__ AELIF  
|             |  
|             |__ QLIF
```

■ جريان ها :

- جریان ثابت $const_current$:

- جریان سینوسی $sine_current$:

- جریان تصادفی، *random_current*:

این تابع در هر لحظه با احتمال ۳۰ درصد پالسی در بازه $pa \in [0, 25000]$ را تولید میکند و در غیر اینصورت جریانی تولید نخواهد کرد.

- جریان پله ای $step_current$:

این تابع در هر لحظه با احتمال ۵ درصد پالسی به اندازه $50000\ pa$ را تولید میکند. در بقیه حالت ها جریانی تولید نخواهد شد.

- جریان خطی $linear_current$:

این تابع بر اساس ضابطه $100t + 3500$ جریان الکتریکی تولید میکند که t همان زمان است.

▪ مدل LIF :

این مدل ساده ترین مدل نورونی موجود است و بسیاری از مکانیسم های نورون واقعی را مدلسازی نمی کند. با استفاده از این مدل نورونی صرفا زمان اسپایک ها و پتانسیل الکتریکی را به ازای یک جریان ورودی ثبت میکند.

پارامتر هایی که برای این مدل نورونی استفاده شد عبارتند از:

$total\ time\ frame: 100\ ms$	$R: 10\ M\ ohm$
$dt: 0.03125\ ms$	$tau: 8\ ms$
$initial\ refractory\ time: 0\ ms$	$u_rest: -79\ mV$
$refractory\ period: 0\ ms$	$threshold: -50\ mV$
	$u_spike: 5\ mV$
	$u_reset: -68\ mV$

حال نتیجه اجرای این مدل نورونی به ازای جریان هایی که معرفی کردیم را میبینیم:

- جریان ثابت:

لحظات اسپایک زدن مدل نورونی در زیر مشاهده میشود:

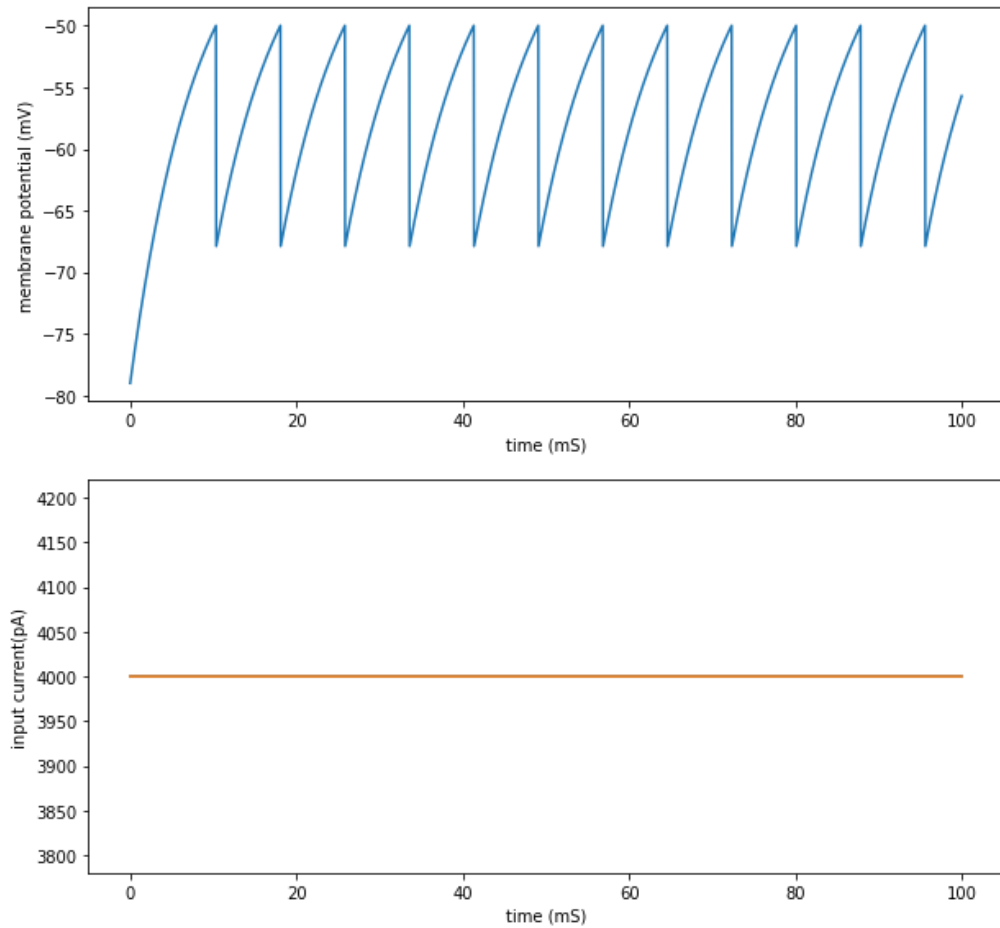
spikes:

[10.3125, 18.0625, 25.8125, 33.5625, 41.3125, 49.0625, 56.8125, 64.5625, 72.3125, 80.0625, 87.8125, 95.5625]

و همچنین نمودار ها در زیر رسم شده اند^۱

^۱ نمودار ها شامل پتانسیل نورونی در زمان مدلسازی، جریان وارد شده به نورون و همچنین پارامتر های مدل نورونی میباشند.

LIF with const current



total time frame: 100 ms
dt: 0.03125 ms
initial refractory time: 0 ms
refractory period: 0 ms

R: 10 M ohm
tau: 8 ms
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

مشاهده میشود که مدل نرونی *LIF* برای یک جریان ثابت با نرخ ثابتی شروع به اسپایک زدن کرده و این روند در طول زمان ادامه می یابد.

- جریان سینوسی:

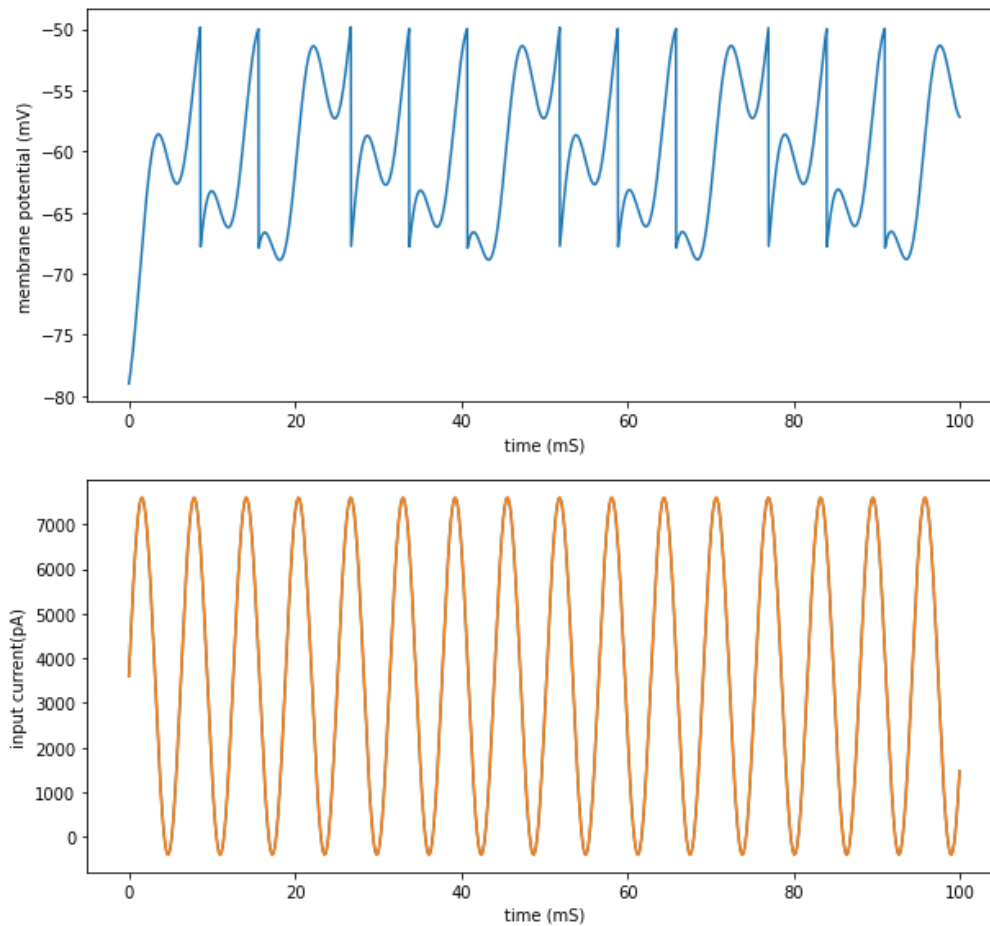
زمان اسپایک ها :

spikes:

[8.59375, 15.59375, 26.71875, 33.71875, 40.71875, 51.84375, 58.84375, 65.84375, 76.96875, 83.96875, 90.96875]

نمودار ها :

LIF with sine current



total time frame: 100 mS

dt: 0.03125 mS

initial refractory time: 0 mS

refractory period: 0 mS

R: 10 M ohm

tau: 8 mS

u_rest: -79 mV

threshold: -50 mV

u_spike: 5 mV

u_reset: -68 mV

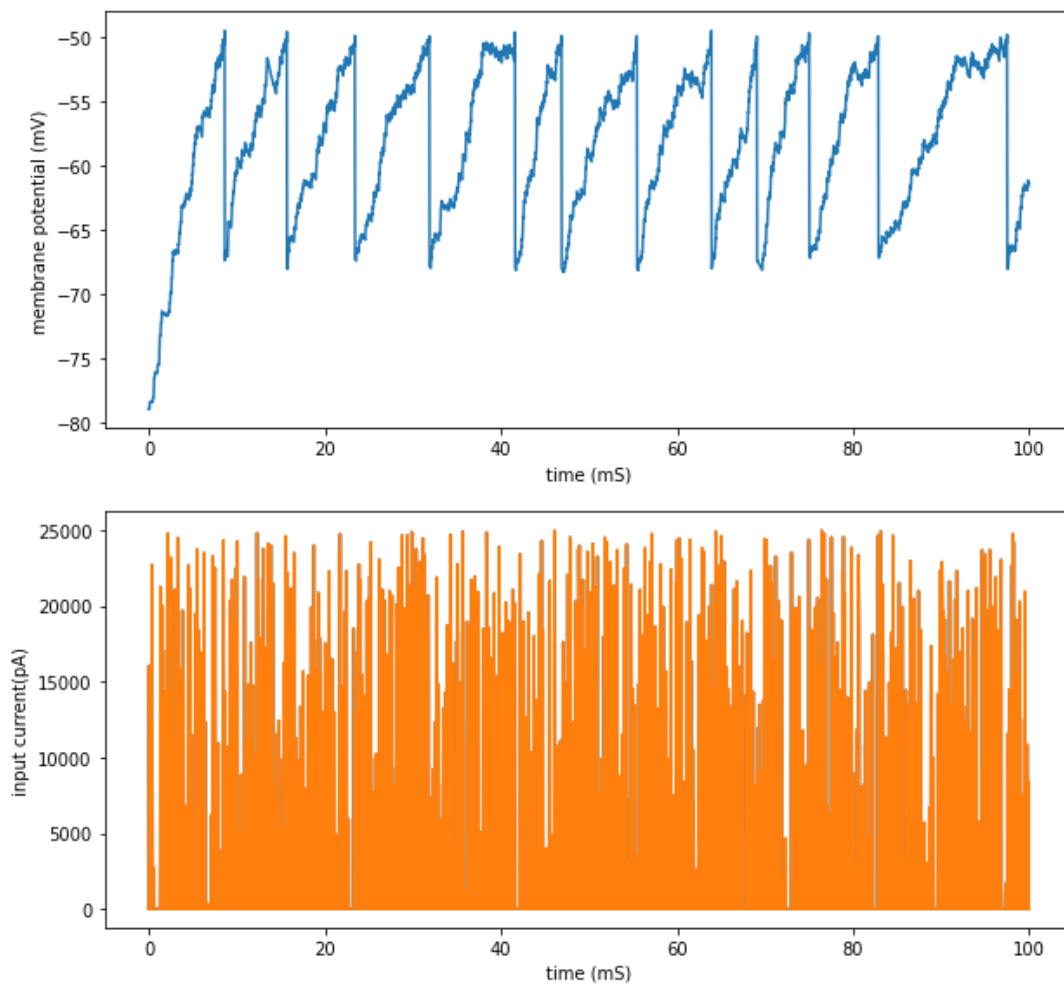
• جریان تصادفی:

زمان اسپایک ها :

```
spikes:
[8.625, 15.6875, 23.40625, 31.875, 41.59375, 46.875, 55.4375, 63.90625
, 69.0625, 75.0, 82.84375, 97.46875]
```

نمودار ها:

LIF with random current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS

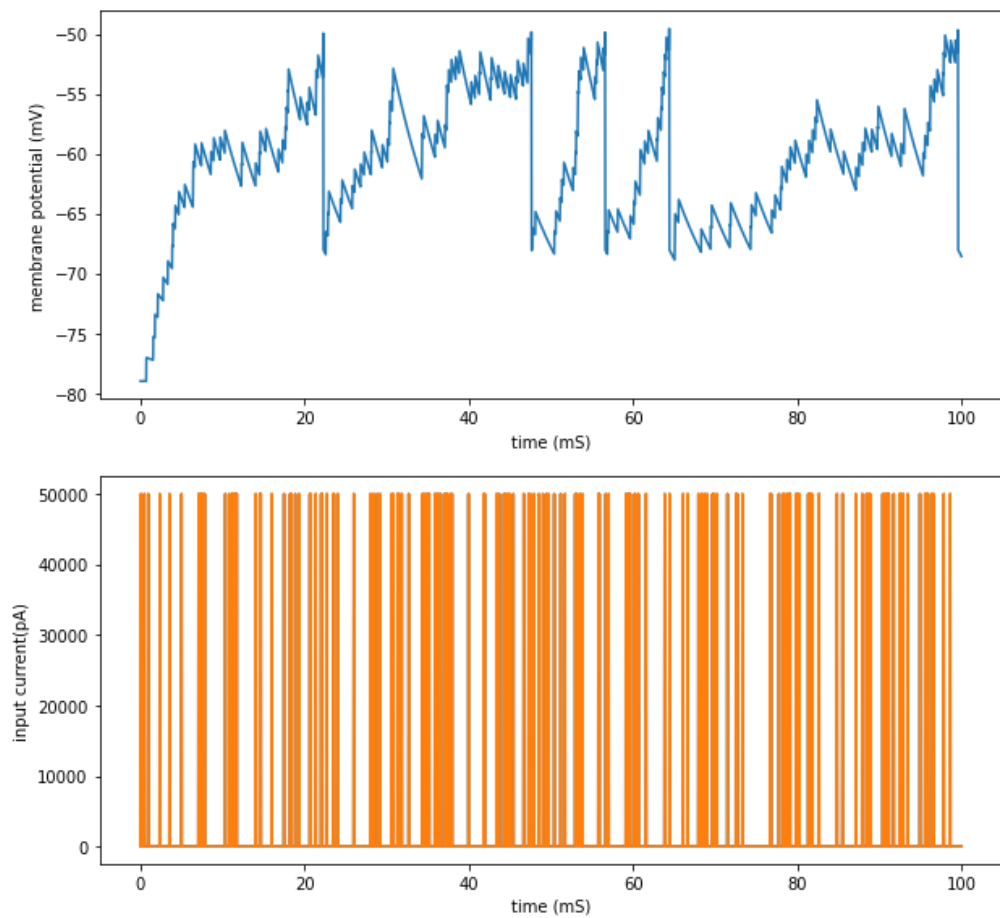
R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

- جریان پله ای:
اسپایک ها :

spikes:
[22.25, 47.59375, 56.5625, 64.375, 99.53125]

نمودار ها:

LIF with step current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

با توجه به اینکه در تابع پله ای نسبت به تابع تصادفی احتمال خروجی مثبت جریان کمتر است به وضوح میبینیم حتی با وجود بزرگتر بودن پالس ها تعداد اسپایک های کمتری نسبت به حالت قبل تولید شده اند. این موضوع نشان میدهد تعداد دفعاتی که جریان مثبت میشود و پیوستگی این روند نقش پررنگ تری نسبت به مقدار پالس ورودی در اسپایک زدن نوروں دارد.

● جریان خطی:

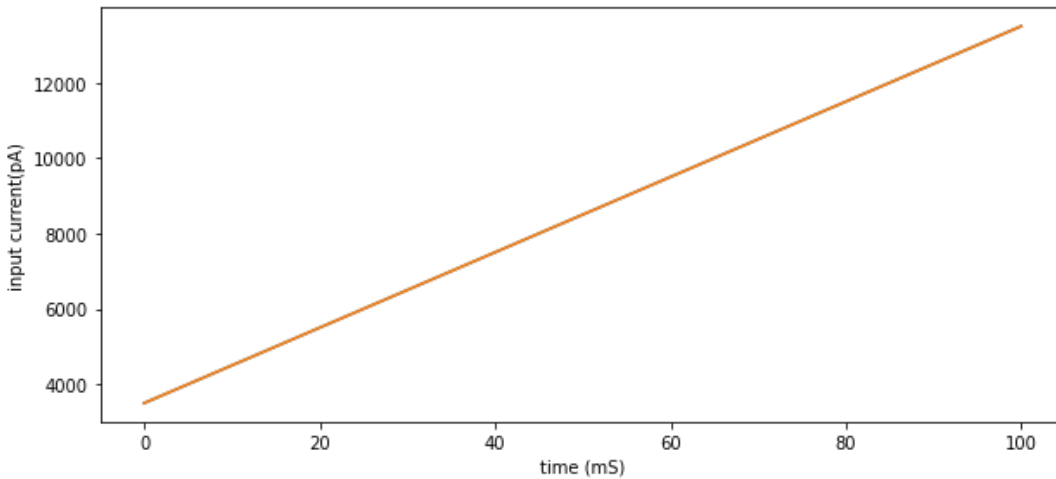
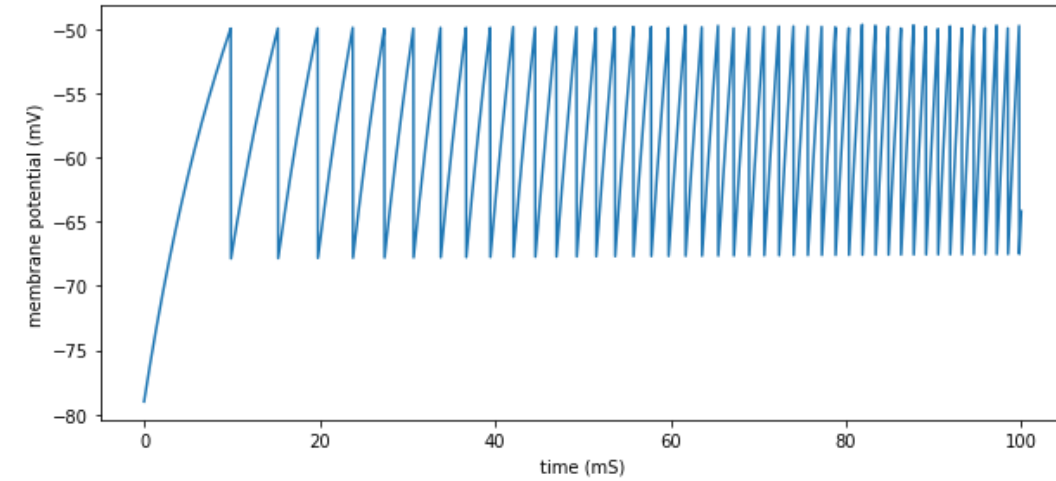
اسپایک ها :

spikes:

[9.875, 15.25, 19.78125, 23.78125, 27.375, 30.6875, 33.78125, 36.6875, 39.4375, 42.0625, 44.5625, 46.96875, 49.28125, 51.5, 53.65625, 55.75, 57.78125, 59.75, 61.6875, 63.5625, 65.40625, 67.1875, 68.9375, 70.65625, 72.34375, 74.0, 75.625, 77.21875, 78.78125, 80.3125, 81.84375, 83.34375, 84.8125, 86.25, 87.6875, 89.09375, 90.46875, 91.84375, 93.1875, 94.53125, 95.84375, 97.15625, 98.4375, 99.71875]

از شکل صفحه بعد میتوانید مشاهده کنید که با افزایش جریان ورودی نرخ اسپایک های مدل نوروںی به مرور بیشتر میشود. طبیعی است که هر چه شیب تابع جریان را افزایش دهیم نرخ اسپایک ها هم افزایش می یابند.

LIF with linear current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS

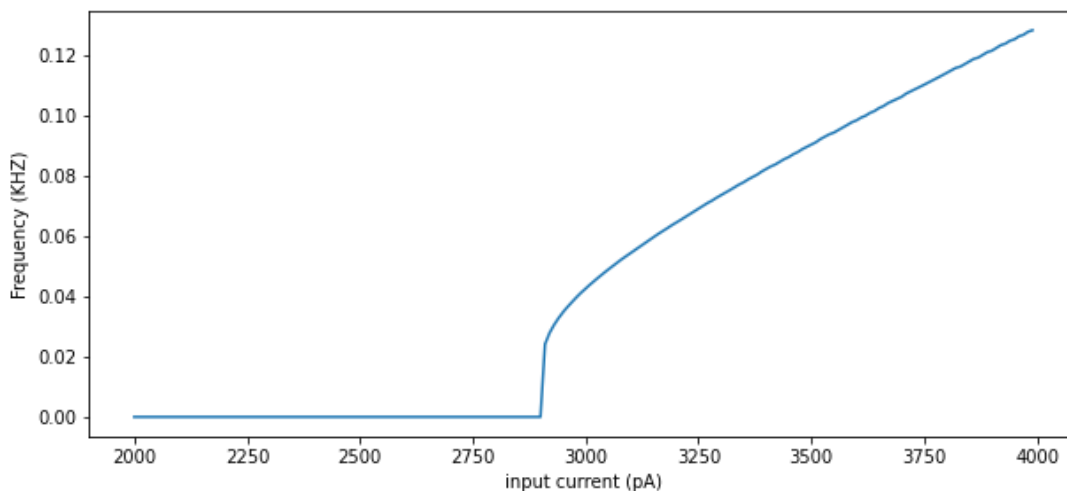
R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

- فرکانس اسپایک ها به ازای جریان های ثابت:

در نمودار زیر میتوان فرکانس اسپایک های مدل نورونی *LIF* را به ازای جریان های ثابت در بازه $[2000, 4000] pA$ را مشاهده کرد. این مدل نورونی به ازای جریان های ثابت

کوچکتر از حدودا 2900 pA دارای اسپایک فرکانس صفر است و این به این معناست برای جریان های کوچکتر از این مقدار نورون همواره در *passive membrane potential* قرار دارد. بعد از این مقدار فرکانس با سرعت رشد بالایی افزایش می یابد و رفته رفته از این شدت افزایش کاسته میشود.

frequency for LIF model



▪ مدل *ALIF*:

این مدل نورونی همان مدل نورونی *LIF* است با این تفاوت که مکانیسم *Adaptation* به آن افزوده شده است. این مکانیسم باعث میشود که فعالیت نورون و تغییرات پتانسیل الکتریکی آن علاوه بر جریان وارده به نورون به تاریخچه فعالیت آن نورون هم وابسته باشد. یکی از کارکرد های اصلی این مکانیسم انتقال پیام های عصبی توام با بیشترین صرفه جویی در مصرف انرژی است.

معادله دیفرانسیل حاکم بر مکانیسم *Adaptation* به صورت زیر است:

$$\tau_k \frac{dW_k}{dt} = a_k(u - u_{rest}) - W + \tau_k \cdot b_k \sum_{t^f} \delta(t - t^f)$$

که k نشان دهنده اندیس مکانیسم است. چون در یک مدل نورونی ممکن است بیش از یک مکانیسم *Adaptation* وجود داشته باشد. ما در این سری از تمارین برای سادگی تنها یک مکانیسم آداپته شدن را در نظر گرفتیم. هرچند کلاسی که برای این مکانیسم در ماژول *Pyneuron.py* پیاده سازی کرده ایم این قابلیت را دارد که به تعداد دلخواهی مکانیسم آداپته شدن برای آن تعریف شود.

در ادامه خروجی این مدل نوروئی به ازای جریان های مختلفی که از قبل تعریف کردیم آمده است:

• جریان ثابت:

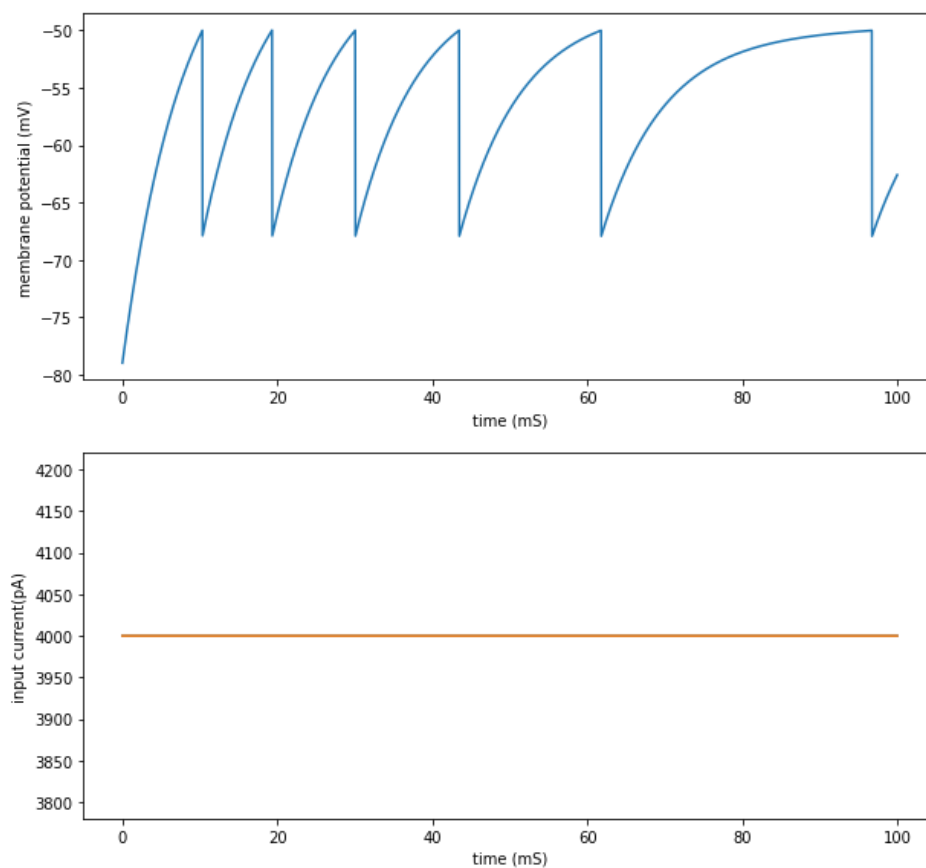
اسپایک ها :

spikes:

[10.3125, 19.3125, 30.03125, 43.4375, 61.75, 96.6875]

نمودار:

ALIF with const current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

مشاهده میشود که به ازای یک جریان ثابت فاصله زمانی بین دو اسپایک متوالی به مرور زمان افزایش می یابد. این پدیده به علت وجود مکانیسم آداپته شدن در این مدل نوروئی است. در واقع نوروں در این حالت در صورتی که توسط یک جریان ورودی تحریک شود میتواند به فعالیت خود ادامه دهد و نوروں های *post synaptic* خود را از وجود جریان ورودی آگاه کند و همزمان با کاهش فرکانس اسپایک ها در مصرف انرژی صرفه جویی کند.

● جریان سینوسی:

اسپایک ها:

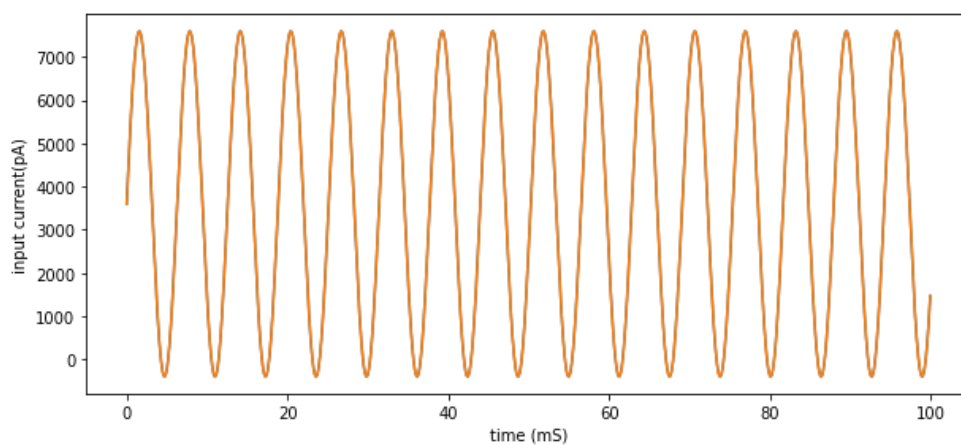
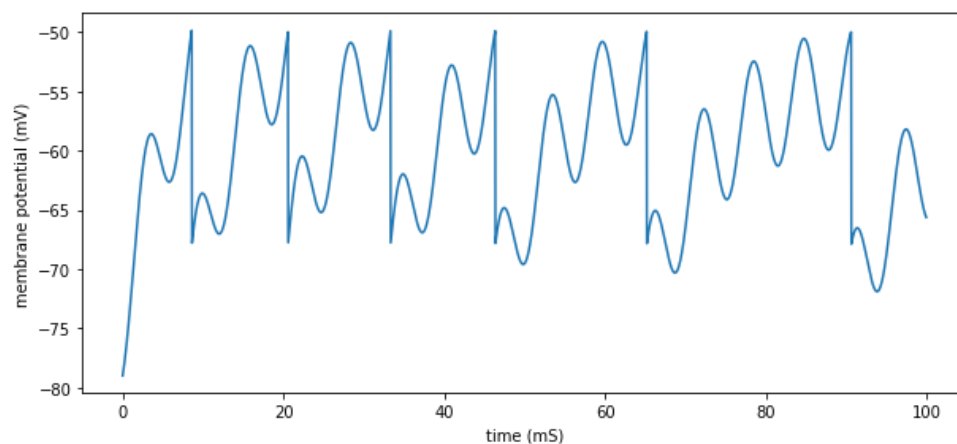
spikes:

[8.59375, 20.5625, 33.3125, 46.34375, 65.1875, 90.625]

*** از این قسمت و نیز قسمت قبل این کاهش نرخ اسپایک ها به وضوح مشخص هستند. در جریان هایی که در ادامه بررسی خواهند شد نیز میتوان نتیجه مشابهی را مشاهده کرد.

نمودار:

ALIF with sine current



total time frame: 100 mS
 dt: 0.03125 mS
 initial refractory time: 0 mS
 refractory period: 0 mS
 a: 0.01
 b: 500 pA
 tau_adaptation: 30 mS

R: 10 M ohm
 tau: 8 mS
 u_rest: -79 mV
 threshold: -50 mV
 u_spike: 5 mV
 u_reset: -68 mV

افزایش فاصله بین اسپایک های متوالی نسبت به مدل قبل کاملاً مشهود است.

• جریان تصادفی:

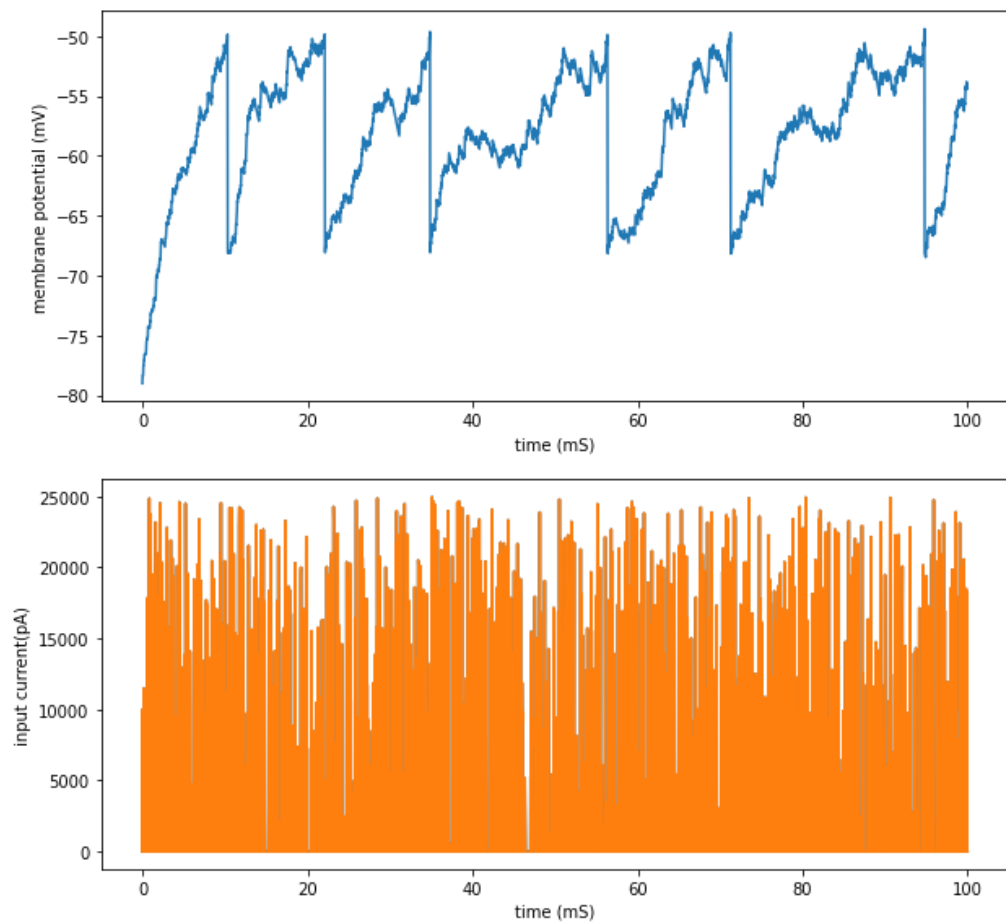
اسپایک ها:

spikes:

[10.3125, 22.09375, 34.84375, 56.34375, 71.25, 94.75]

نمودار:

ALIF with random current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS

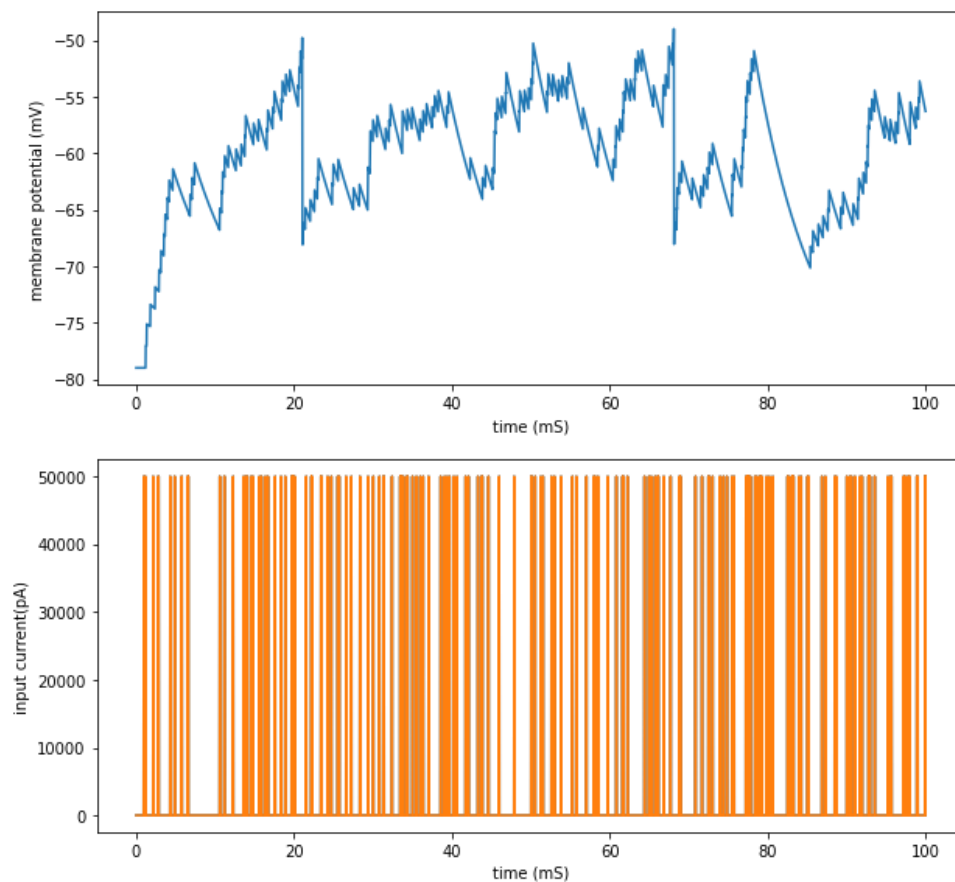
R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

• جریان پله ای:
اسپایک ها :

spikes:
[21.03125, 68.09375]

نمودار ها :

ALIF with step current



total time frame: 100 mS
 dt: 0.03125 mS
 initial refractory time: 0 mS
 refractory period: 0 mS
 a: 0.01
 b: 500 pA
 tau_adaptation: 30 mS

R: 10 M ohm
 tau: 8 mS
 u_rest: -79 mV
 threshold: -50 mV
 u_spike: 5 mV
 u_reset: -68 mV

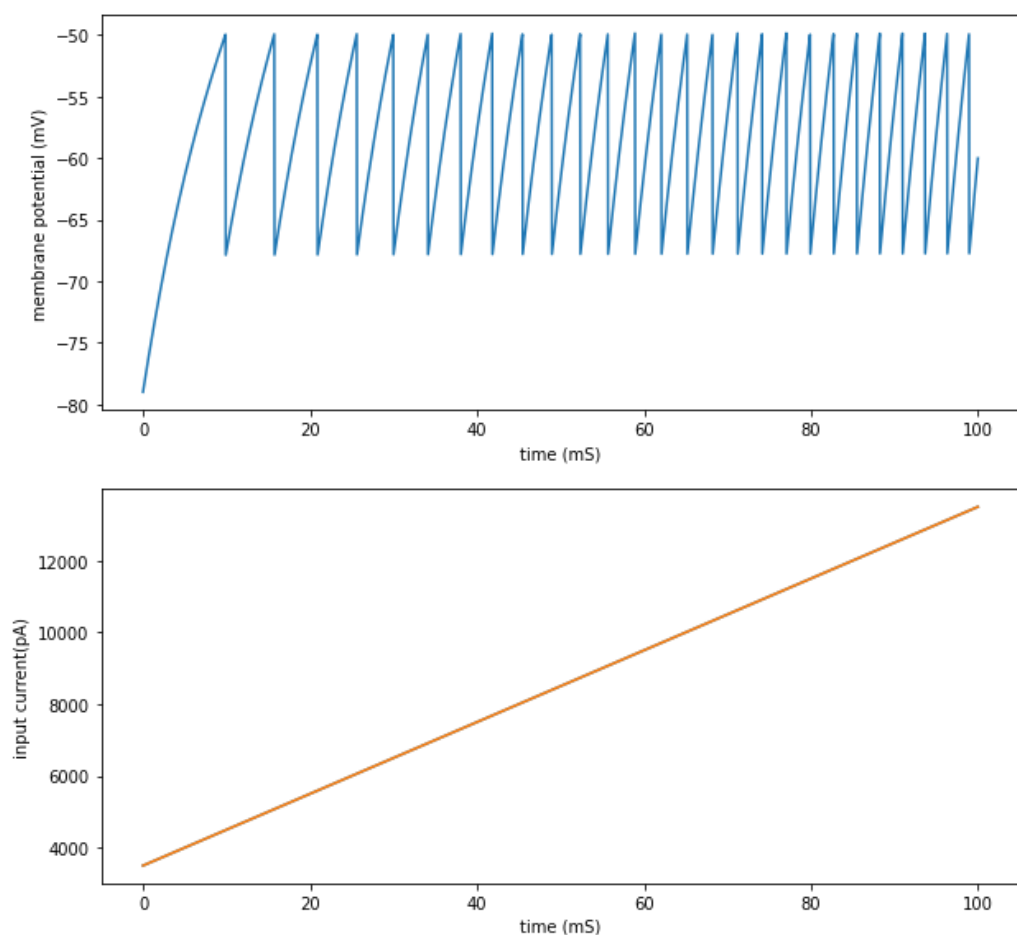
• جریان خطی:

اسپایک ها :

```
spikes:
[9.875, 15.71875, 20.875, 25.59375, 29.96875, 34.09375, 38.03125, 41.8
125, 45.4375, 48.9375, 52.34375, 55.65625, 58.90625, 62.0625, 65.15625,
68.1875, 71.1875, 74.125, 77.03125, 79.875, 82.6875, 85.46875, 88.21875
, 90.9375, 93.625, 96.28125, 98.90625]
```

نمودار ها:

ALIF with linear current



total time frame: 100 ms

dt: 0.03125 ms

initial refractory time: 0 ms

refractory period: 0 ms

a: 0.01

b: 500 pA

tau_adaptation: 30 ms

R: 10 M ohm

tau: 8 ms

u_rest: -79 mV

threshold: -50 mV

u_spike: 5 mV

u_reset: -68 mV

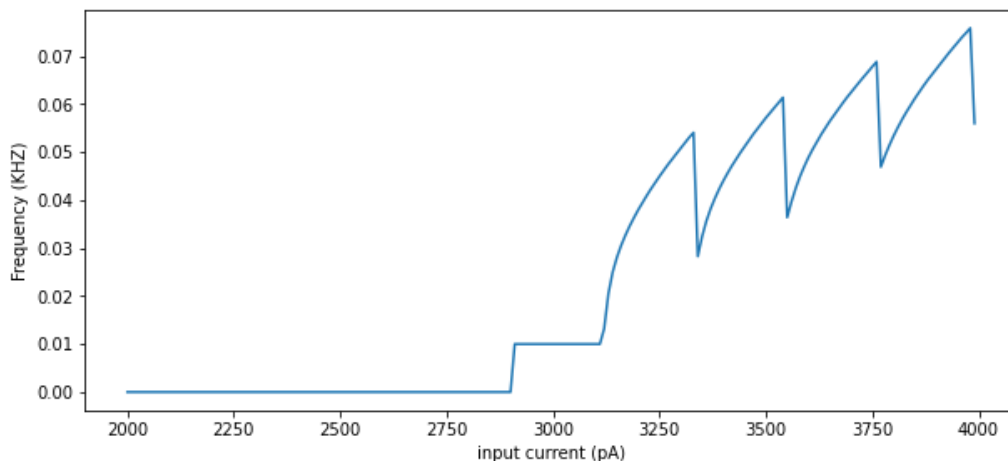
مشابه تمام حالت های قبل اگر بین نمودار پتانسیل الکتریکی نورون ها مقایسه انجام دهیم، تاثیر مکانسیم آداپته شدن در کاهش نرخ اسپایک ها کاملاً مشخص است.

- فرکانس اسپایک ها به ازای جریان های ثابت:

در نمودار زیر میتوان فرکانس اسپایک های مدل نورونی *ALIF* را به ازای جریان های ثابت در بازه $[2000, 4000] pA$ را مشاهده کرد. این مدل نورونی به ازای جریان های

ثابت کوچکتر از حدودا 2900 pA دارای اسپایک فرکانس صفر است و این به این معناست برای جریان های کوچکتر از این مقدار نوروں همواره در *passive membrane potential* قرار دارد.

frequency for ALIF model



▪ مدل *AE LIF* :

این مدل نورونی مشابه مدل نورونی *ALIF* حاوی مکانیسم آداپته شدن نوروں است. اما تفاوتی که با مدل های نورونی *LIF* و *ALIF* دارد این است که تابع بازگرداننده نوروں به حالت پتانسیل *rest* علاوه بر یک ترم خطی، شامل یک ترم نمایی نیز هست. در زیر این ضابطه این تابع آمده است.

$$F(u) = \Delta_t \cdot e^{\left(\frac{u - \theta_{rh}}{\Delta_t}\right)}$$

ضابطه بالا نشان میدهد که برای مقادیر پتانسیل کمتر از θ_{rh} ترم نمایی بسیار تاثیر کمی در تغییرات پتانسیل نوروں دارد. اما بعد از این مقدار تاثیر آن از ترم خطی بیشتر میشود. از طرفی یکی دیگر از تفاوت های این مدل با مدل های قبلی مشخص بودن *Active potential* است.

در ادامه خروجی این مدل نورونی به ازای جریان های مختلفی که از قبل تعریف کردیم آمده است:

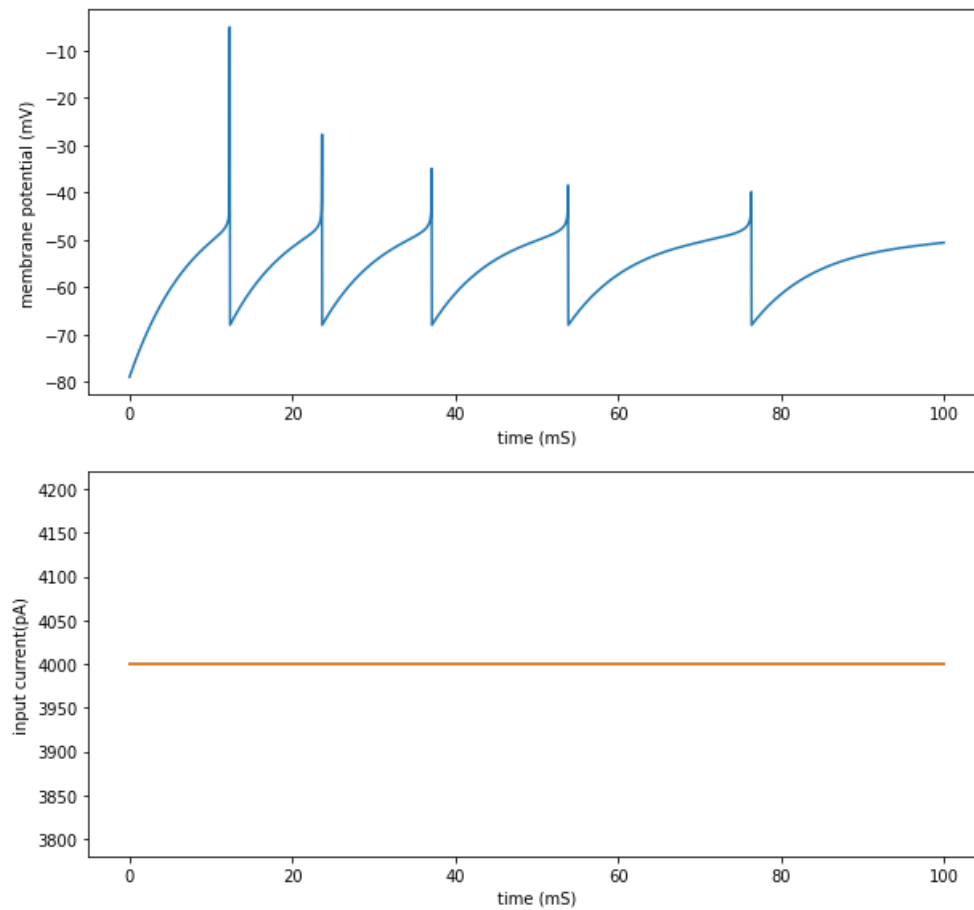
• جریان ثابت:

اسپایک ها:

spikes:
[12.34375, 23.65625, 37.125, 53.875, 76.375]

نمودار ها :

AELIF with const current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS
delta_T: 1 mV

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

• جریان سینوسی:

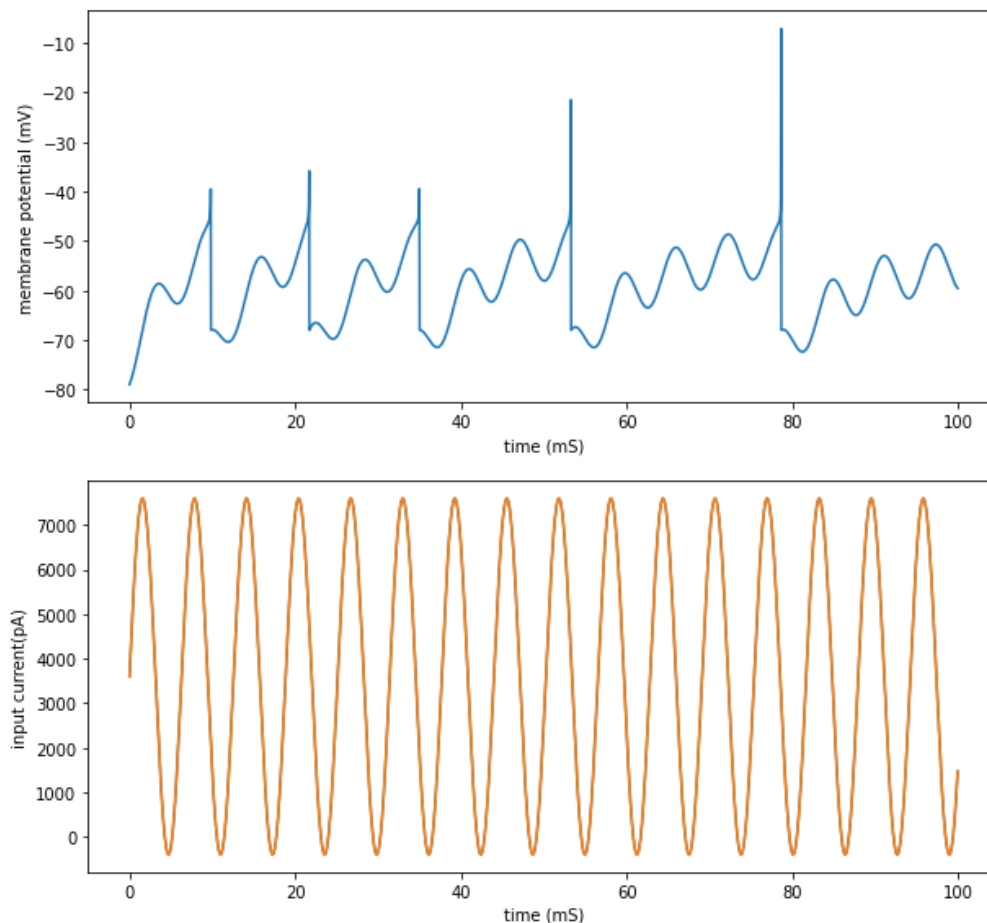
اسپایک ها:

spikes:

[9.84375, 21.71875, 35.03125, 53.3125, 78.6875]

نمودار ها:

AELIF with sine current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS
delta_T: 1 mV

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

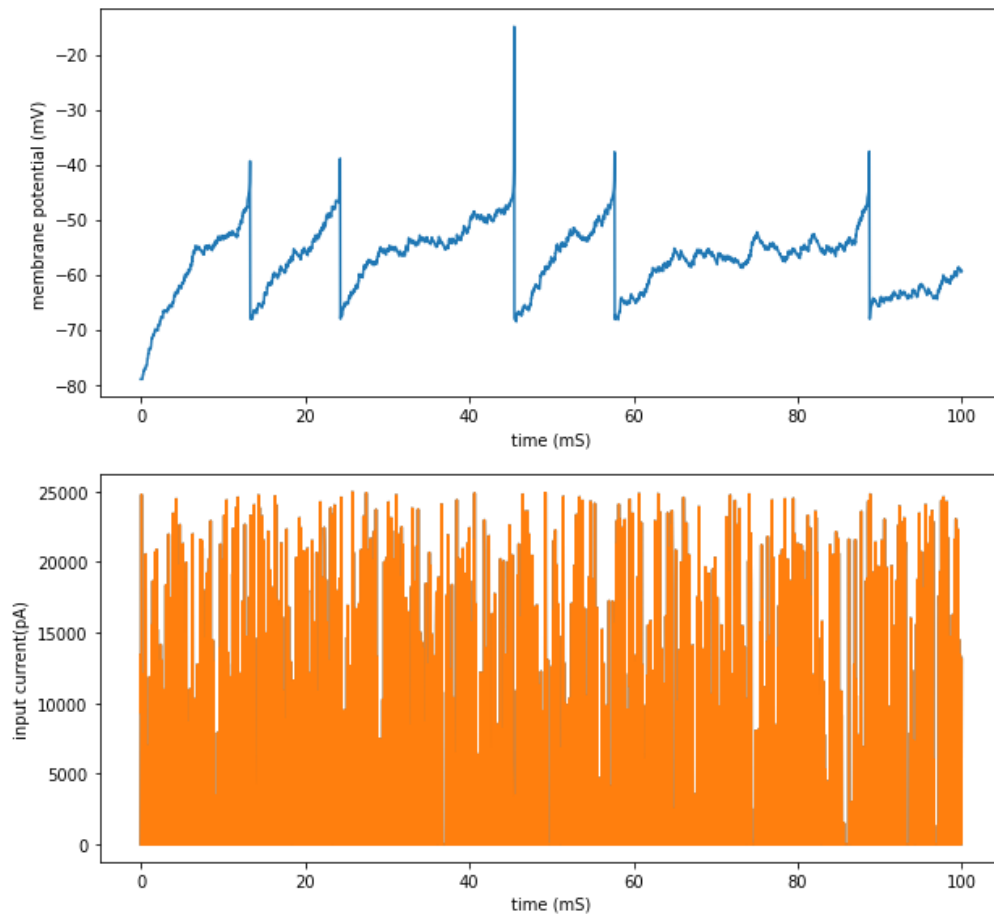
• جریان تصادفی:

اسپایک ها:

spikes:
[13.34375, 24.3125, 45.5, 57.71875, 88.75]

نمودار ها:

AELIF with random current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS
delta_T: 1 mV

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

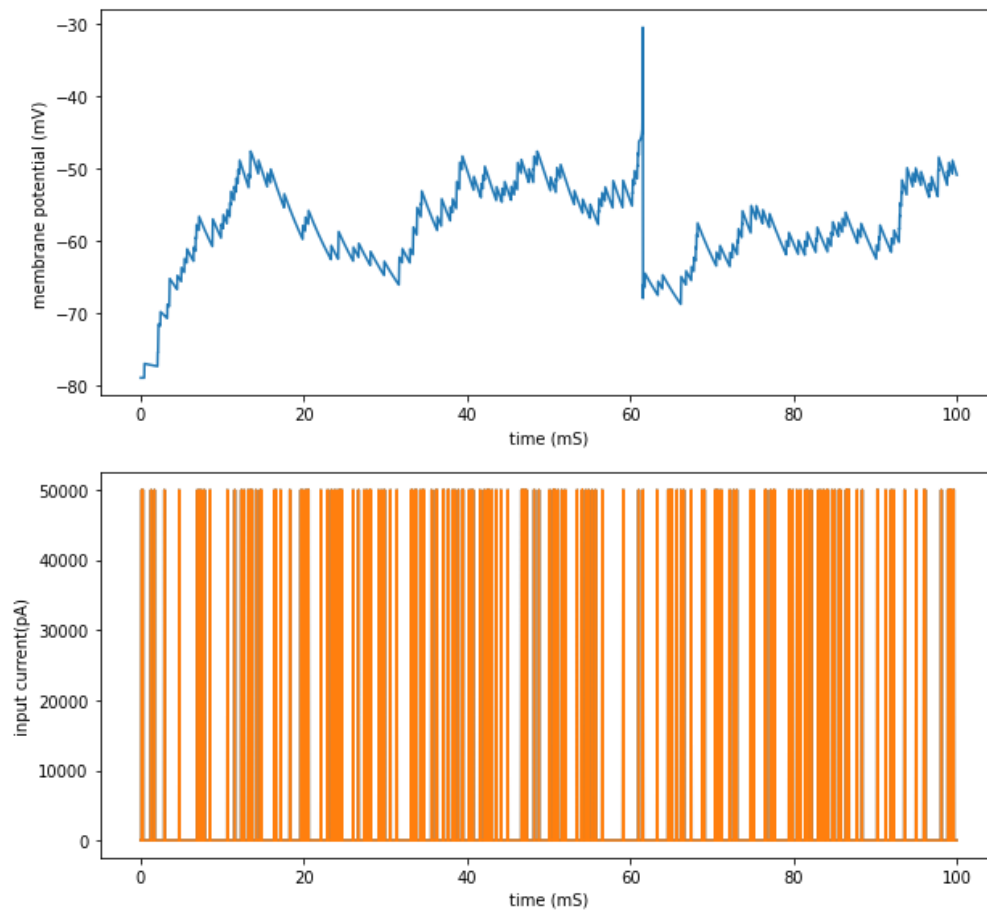
• جریان پله ای:

اسپایک ها :

spikes:
[61.53125]

نمودارها:

AELIF with step current



total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS
delta_T: 1 mV

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

• جریان خطی:

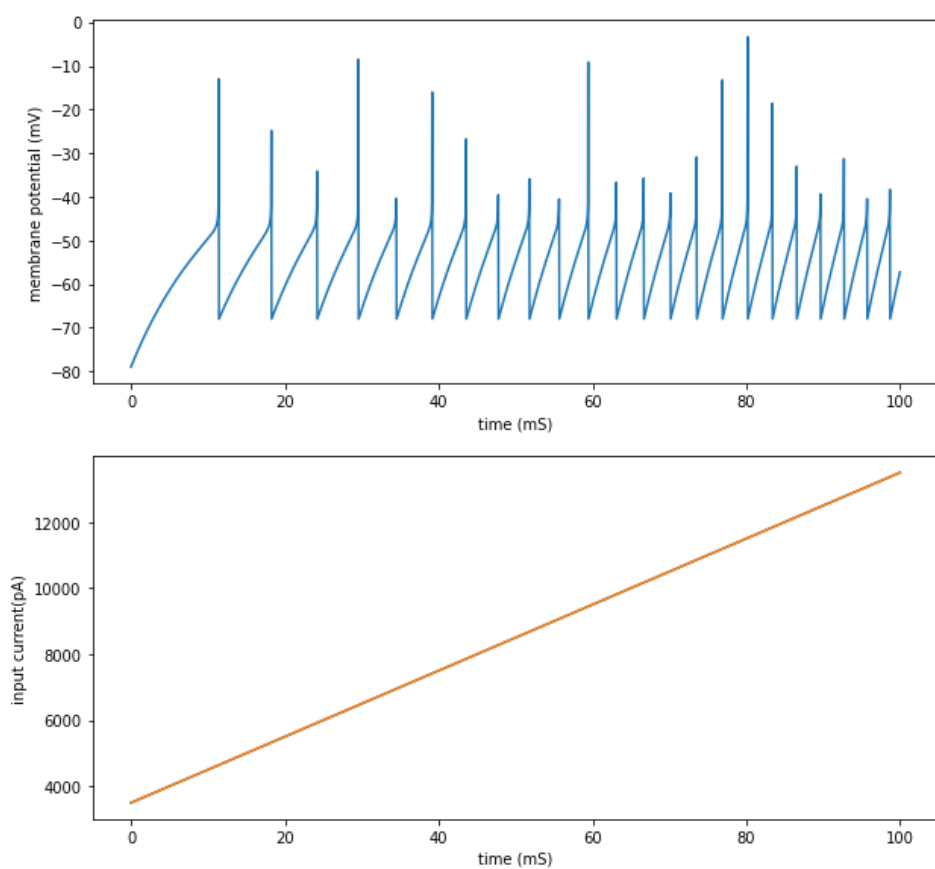
اسپایک ها:

spikes:

[11.4375, 18.28125, 24.21875, 29.59375, 34.53125, 39.1875, 43.59375, 47.78125, 51.8125, 55.6875, 59.46875, 63.125, 66.6875, 70.15625, 73.5625, 76.90625, 80.1875, 83.40625, 86.5625, 89.65625, 92.71875, 95.71875, 98.6875]

نمودار ها :

AELIF with linear current



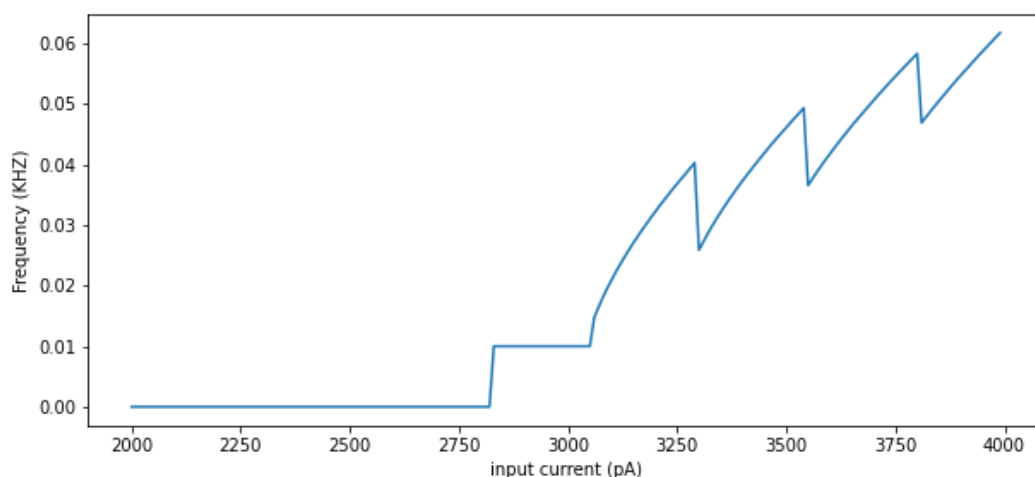
total time frame: 100 mS
dt: 0.03125 mS
initial refractory time: 0 mS
refractory period: 0 mS
a: 0.01
b: 500 pA
tau_adaptation: 30 mS
delta_T: 1 mV

R: 10 M ohm
tau: 8 mS
u_rest: -79 mV
threshold: -50 mV
u_spike: 5 mV
u_reset: -68 mV

- فرکانس اسپایک ها به ازای جریان های ثابت:

در نمودار زیر میتوان فرکانس اسپایک های مدل نوروئی *AELIF* را به ازای جریان های ثابت در بازه $[2000, 4000] pA$ را مشاهده کرد. این مدل نوروئی به ازای جریان های ثابت کوچکتر از حدودا $2800 pA$ دارای اسپایک فرکانس صفر است و این به این معناست برای جریان های کوچکتر از این مقدار نوروئ همواره در *passive membrane potential* قرار دارد.

frequency for AELIF model



در این سری از تمرین سه مدل نوروئی خواسته شده به همراه پنج نوع جریان مختلف بررسی شد و مقایسه کوچکی هم بین آنها انجام گرفت.