



$$\frac{VF}{RT} = \varepsilon \quad \text{and} \quad I = I_K + I_{Na} + I_{Cl} = 0 \quad (1)$$

$$I_K = \frac{K_{out} e^{-\varepsilon} - K_{in}}{e^{-\varepsilon} - 1} \cdot \frac{u^* VF}{l}, \quad I_{Na} = \frac{Na_{out} e^{-\varepsilon} - Na_{in}}{e^{-\varepsilon} - 1} \cdot \frac{u^* VF}{l}$$

$$I_{Cl} = \frac{Cl_{out} e^{\varepsilon} - Cl_{in}}{e^{\varepsilon} - 1} \cdot \frac{u^* FV}{l} = \frac{u^* FV}{l} \cdot \frac{Cl_{in} e^{-\varepsilon} - Cl_{out}}{e^{-\varepsilon} - 1}$$

summing up

$$I_K + I_{Na} + I_{Cl} = \frac{u^* VF}{l(e^{-\varepsilon} - 1)} \left( Na_{out} e^{-\varepsilon} - Na_{in} + K_{out} e^{-\varepsilon} - K_{in} + Cl_{in} e^{-\varepsilon} - Cl_{out} \right) = 0$$

$$e^{-\varepsilon} (Na_{out} + K_{out} + Cl_{in}) = Na_{in} + K_{in} + Cl_{out}$$

$$e^{\varepsilon} = \frac{Na_{out} + K_{out} + Cl_{in}}{Na_{in} + K_{in} + Cl_{out}} \rightarrow \varepsilon = \ln \left( \frac{Na_{out} + K_{out} + Cl_{in}}{Na_{in} + K_{in} + Cl_{out}} \right)$$

$$V = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{Na_{out} + K_{out} + Cl_{in}}{Na_{in} + K_{in} + Cl_{out}} \right)$$

and so on

!c p, ... (2)

$$\frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{C_m r_m} = \frac{I_m}{C_m} + \frac{E_R}{r_m C_m} = \frac{I(t)}{A C_m} + \frac{E_R}{r_m C_m}$$

$$A = 4\pi R^2, E_R = r_m (g_l |E_l| + g_k E_k + g_{Na} E_{Na}) \cdot r_m$$

$$C_m = \frac{C}{A}, r_m = \frac{1}{g_l + g_k + g_{Na}}, \tau = C_m \cdot r_m$$

$$\omega = \frac{2}{\tau} \quad I(t) = \begin{cases} I_0 \sin(\frac{\pi}{2} \omega t), & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}$$

$$p(x) = \frac{1}{\tau}, g(x) = \frac{I(t)}{A C_m} + \frac{E_R}{\tau}$$

$$0 < t \leq \tau$$

$$V_m = e^{-\frac{t}{\tau}} \left( \text{const} + \int e^{\frac{t}{\tau}} \left( \frac{I(t)}{A C_m} + \frac{E_R}{\tau} \right) dt \right)$$

$$\int e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{E_R}{\tau} dt = E_R e^{\frac{t}{\tau}}$$

$$\int e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{I(t)}{A C_m} dt \xrightarrow{0 < t \leq \tau} \int e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{I_0 \sin(\frac{\pi}{2} \omega t)}{A C_m} dt = \frac{I_0}{A C_m} \int e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} \omega t) dt$$

$$= -\frac{I_0}{A C_m} \left( \frac{2\tau e^{\frac{t}{\tau}} (\pi \tau \omega \cos(\frac{\pi t \omega}{2}) - 2 \sin(\frac{\pi t \omega}{2}))}{\pi^2 \tau^2 \omega^2 + 4} \right)$$

$$V_{m1} = \text{const}_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + E_R - \frac{I_0}{A C_m} \left( \frac{2\tau (\pi \tau \omega \cos(\frac{\pi t \omega}{2}) - 2 \sin(\frac{\pi t \omega}{2}))}{\pi^2 \tau^2 \omega^2 + 4} \right)$$

$$I = 0 \quad \leftarrow t > \tau$$

$$V_{m2} = \text{const}_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + E_R$$

$$V_m(0) = E_R$$

$$V_{m1}(T) = V_{m2}(T)$$



!|||... ...

$$V_m(0) = E_R = \text{const} + E_R - \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\tau(\pi\tau\omega)}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right)$$

$$\text{const}_1 = \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\pi\tau^2\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right)$$

$\omega = \frac{2}{T}$   
 $\frac{t\omega}{2} \rightarrow 1$   
 $t=T$

!|||... ...

$$V_{m1}(T) = \text{const}_1 e^{-\frac{T}{\tau}} + E_R - \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\tau(-\pi\tau\omega)}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right)$$

$$V_{m2}(T) = \text{const}_2 e^{-\frac{T}{\tau}} + E_R$$

$$V_{m1}(T) = V_{m2}(T) \rightarrow \text{const}_2 e^{-\frac{T}{\tau}} = \text{const}_1 e^{-\frac{T}{\tau}} + \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\tau^2\pi\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right)$$

$$\text{const}_2 = \text{const}_1 + \frac{I_0}{AC_m} e^{\frac{T}{\tau}} \left( \frac{2\tau^2\pi\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right)$$

!|||... ...

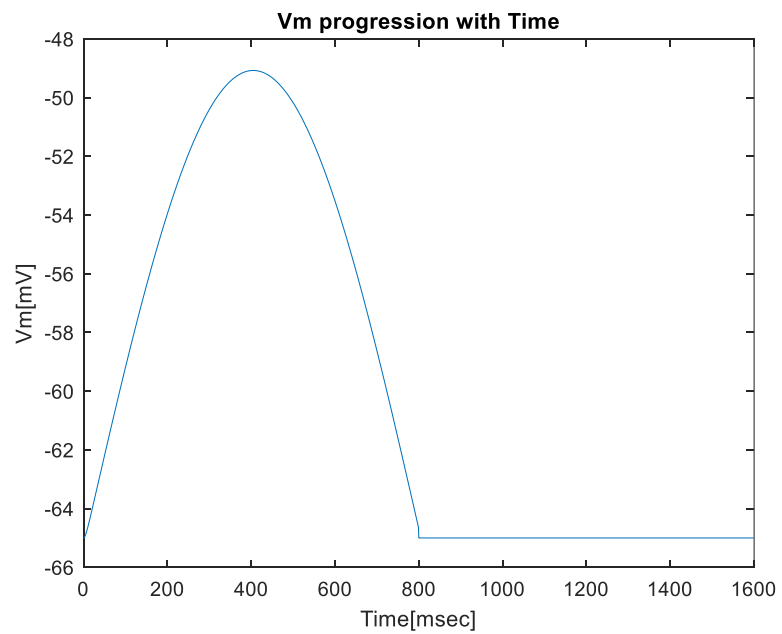
$$V_m = \begin{cases} E_R, & t=0 \\ E_R + \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\pi\tau^2\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\tau(\pi\tau\omega \cos(\frac{\pi t\omega}{2}) - 2\sin(\frac{\pi t\omega}{2}))}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right), & 0 < t \leq T \\ \left( \frac{I_0}{AC_m} \left( \frac{2\pi\tau^2\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right) + \frac{I_0 e^{\frac{T}{\tau}}}{AC_m} \left( \frac{2\tau^2\pi\omega}{\pi^2\tau^2\omega^2 + 4} \right) \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + E_R, & t > T \end{cases}$$

!|||... ...

## שאלה 2:

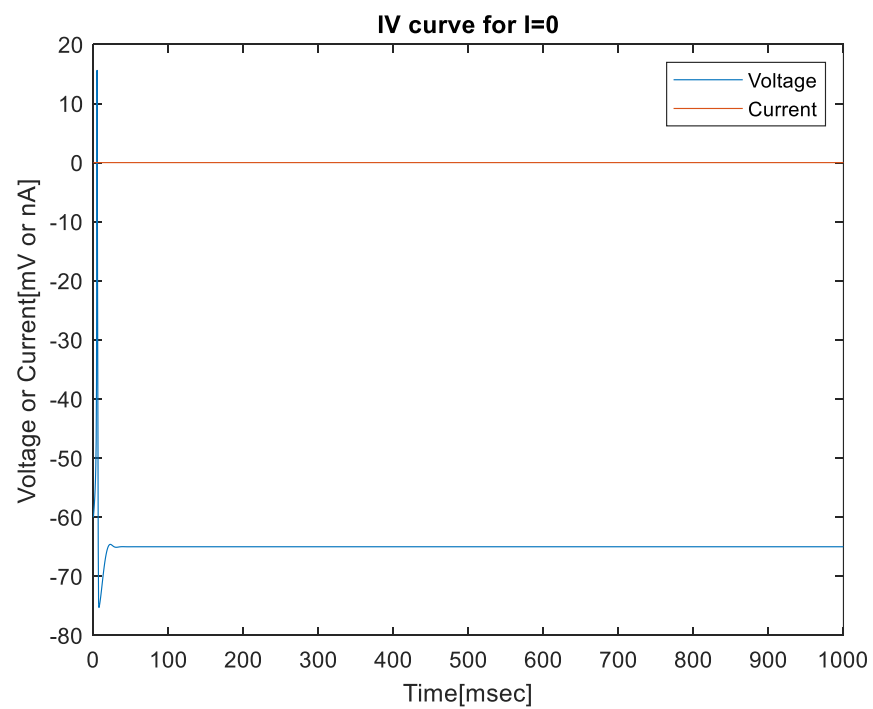
להלן הגרף המתקבלת לאחר בחירת הפרמטרים הבאים:

```
I0 = 10^-9; % A
tau = 5; % msec
T = 800; % msec
Cm = 1; % nF/mm^2
R = 5*10^-6; % m
Er = -65; % mV
```



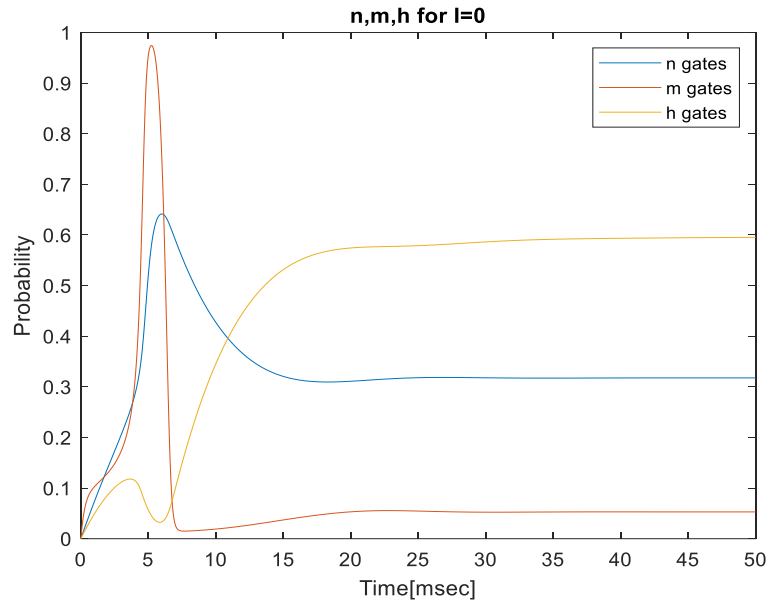
## שאלה 3:

להלן הגרף המתקבל בהרצת המודל:



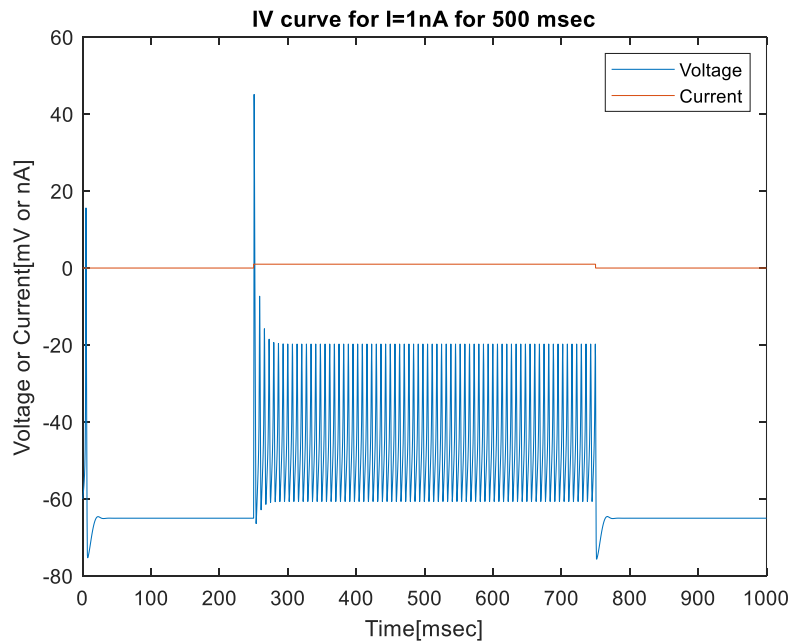
וכפי שניתן לראות, פורץ פוטנציאל פעולה בהתחלה.

לכאורה, איננו נצפה שיצור פוטנציאל פעולה, שכן עבור זרם 0 לא אמור להתקבל שינוי כלשהו. אך נשים לב כי הגדרנו את השערים  $n, m, h$  להיות 0 בהתחלה, מה שאיננו מייצג את המצב בנירן (בריא לפחות). מפני שהקינטיקה של שערי  $m$  מהירה משל שאר השערים, תחילה יפתחו שערים אלה ויאפשרו זרם נתון כך שיתקבל  $I_{Na} > I_K$ , מה שיצור פוטנציאל פעולה. רק לאחר זמן מה, ערכי הסתברות השערים יתייצבו לערכם במצב מנוחה, בו הזרם נטו הוא 0. ניתן לראות ההתנהגות המתוארת בגרף השערים הנ"ל:



שאלה 3ב:

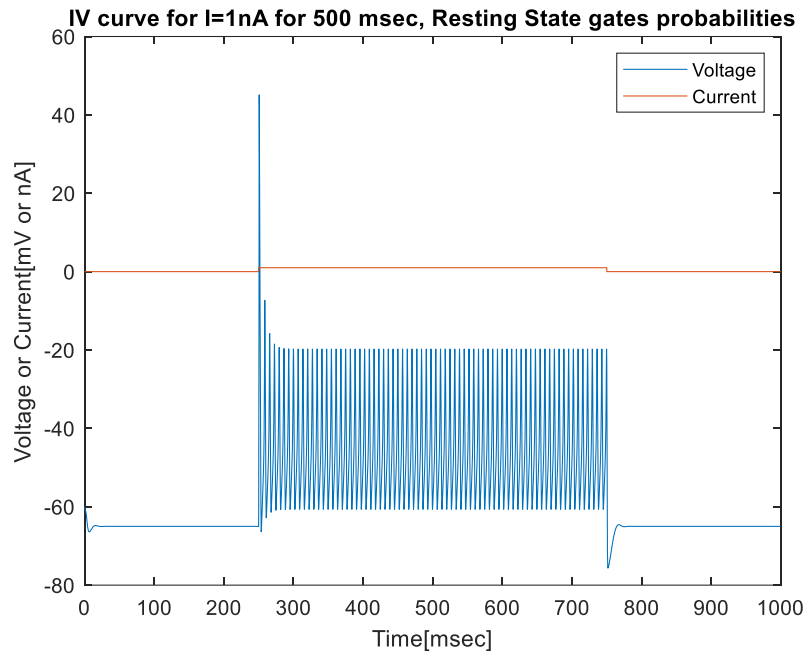
עבור זרם של 1 ננואמפר בין 250 ל-750 מילישניות, הגרף המתקבל:



שאלה 3ג:

תנאי ההתחלה שווה עבור ערכי ההסתברויות של השערים, בהתחלה, על מנת לייצג את מודל הנירן כמתחיל מ Resting State. לשם כך, מלקחו ערכי ההסתברויות עליהן המערכת התייצבה בסעיף א' לאחר זמן.

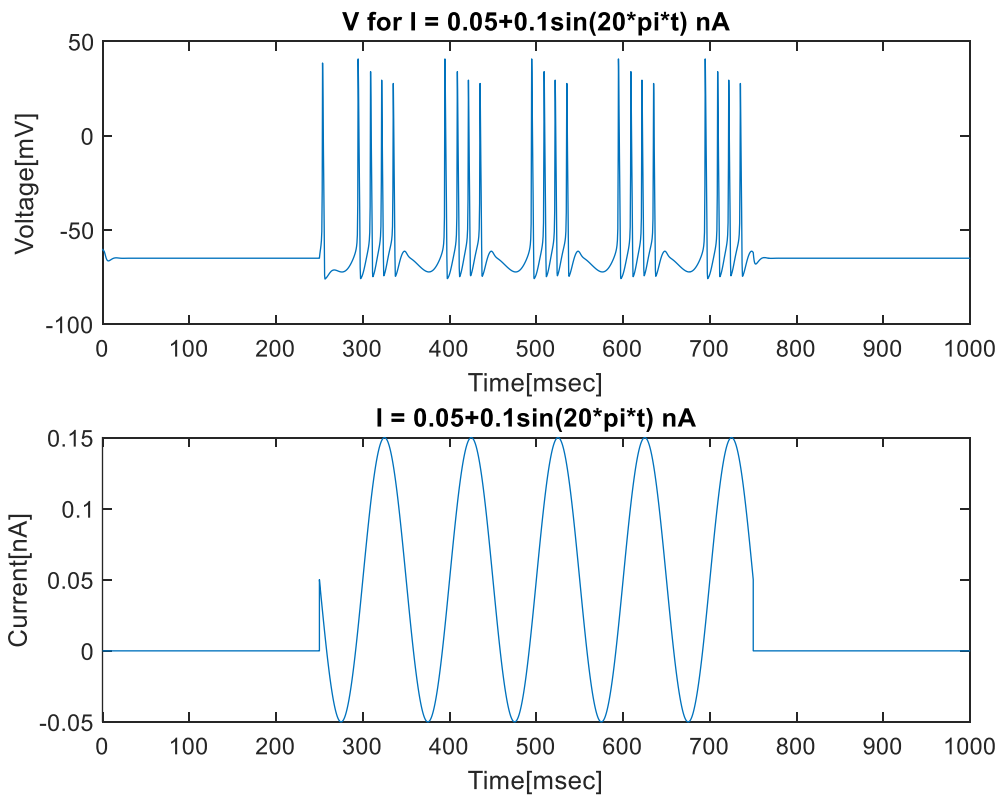
ערכים אלו:  $n=0.318, m=0.053, h=0.596$ . להלן הגרף המתקבל:



וכפי שניתן לראות, לא פורץ כעת פוטנציאל פעולה בהתחלה.

שאלה 3ד:

עבור המודל המשופר, ועם זרים סינוסי כפי שהוגדר בשאלה, מתקבל:



וניתן לראות שפורצים פוטנציאלי פעולה בשלשות, ובמרחקי זמן קבועים.