

9. DIODOA ERREGIMEN DINAMIKOAN

Aurreko hiru ikasgaietan, egoera estatikoan -hau da, tentsioak eta korronteak denboran zehar konstante mantentzen direnean- aztertu dugu PN junturaren funtzionamendua. Kasu horretarako -eta hurbilketa batzuk onartuta-, I-V ezaugarri matematikoa deduzitu dugu: Shockleyren ekuazioa, hain zuzen ere.

Ikasgai honetan, diodoa erregimen dinamikoan ikusiko dugu. Shockleyren ekuazioak jada ez digu balio, zeren eta egindako garapen matematikoa, $dp/dt = dn/dt = 0$, baldintzatik edo egoeratik (geldikortasunaren hipotesitik) abiatzen baitzen.

Izan ere, erregimen dinamikoan ez dago I-V ezaugarri bakar bat, aukera asko baizik. Momentuko egoera ez dago bakarrik aplikatzen den tentsioaren menpe: aurreko egoeraren eta denboran zehar izan den bilakaeraren menpe ere badago. Halere, zenbait hurbilketa ontzat emanaz gero, badago erregimen dinamikoa ebazteko eredu fisiko-matematiko erraz bat: kargaren bidezko kontrol-eredua.

Lehendabiziko lana, beraz, eredu hori ondorioztatzea izango da, gero bi kasu berezietan aplikatzeko: seinale txikiko erregimena eta diodoen kommutazioa. Bi aplikazio horiek, beste dispositibo askotan bezala, interesgarrienak gertatzen dira.

9.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera estatikoan

Kargaren kontrol-ereduaren kontzeptuarekin hasteko, estatikoan dagoen p⁺n diodo (asimetriko) luzetik abiatuko gara.

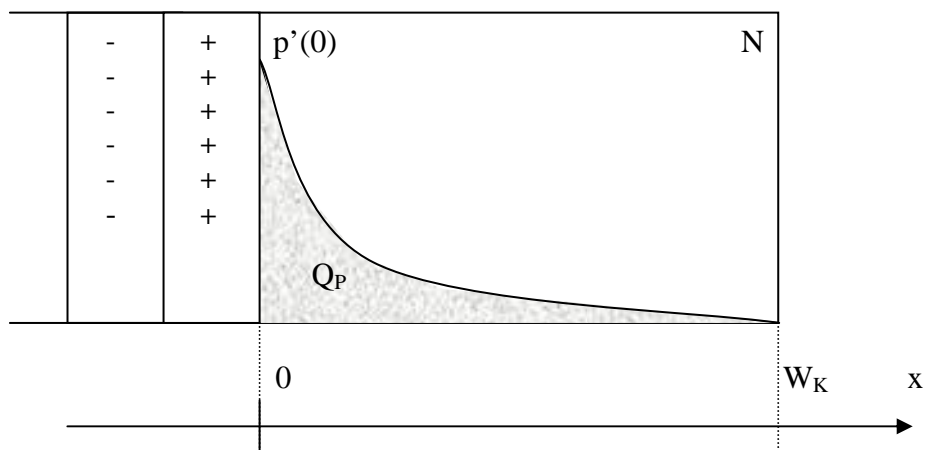
Estatikoan gaudenez, Shockleyren ekuazioa baliagarria da:

$$I = I_{sat} \cdot \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

Anodoak askoz dopaketa altuagoa duenez, katodoak zehazten du I_{sat} . Beraz, katodoari begiratuko diogu hemendik aurrera. Diodoa luzea denez:

$$I_{sat} \approx q \cdot A \cdot L_p \frac{p_{n0}}{\tau_p}$$

Katodoaren eskualde neutroan dagoen karga, zero da, noski. Baina katodoan dagoen urrienen soberakinaren karga (p' hutsuneen soberakinaren karga) ez da nulua. Diodoaren korrontea karga horren funtzioan adierazten badugu, kargak korrontean duen kontrola islatzen da eta horixe da kargaren kontrol-ereduaren oinarria. Eredua konmutazioan erabiltzen da batez ere (bai diodoetan bai transistoreetan).



9.1 Irudia. Katodoan dagoen soberakinaren profila eta urrienen soberakinari dagokion kargaren adierazle den azalera

URRIENEN SOBERAKINAREN KARGAREN EBAZPENA:

Katodoa luzea denez, $W_c \rightarrow \infty$; $p'_n(x) = p'_n(0) \cdot \exp(-x/L_p)$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot \int_0^{W_c} p'_n(x) \cdot dx$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot \int_0^{\infty} p'_n(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_p}} \cdot dx = -q \cdot A_J \cdot p'_n(0) \cdot L_p \cdot \left[e^{-\frac{x}{L_p}} \right]_{x=0}^{x=\infty}$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot p'_n(0) \cdot L_p$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{non } p_{n0} = n_i^2 / N_D)$$

Eta, beraz, korrontearekin alderatuz

$$I = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot \frac{p_{n0}}{\tau_p} \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right):$$

$$I = \frac{Q_p}{\tau_p} = \frac{\text{Urrienen soberakinaren karga}}{\text{Urrienen batezbesteko erdibizitza}}$$

Esanahia ulertzeko, birkonbinaketaren ikuspuntutik begiratuko diogu kontuari. Hain zuzen ere, katodoan gertatzen den birkonbinaketa kalkulatu dugu:

$$q \cdot \text{Birk}_{\text{bolumenean}} = q \cdot \int U \cdot dV = q \cdot A \cdot \int_0^{\infty} U \cdot dx = q \cdot A \cdot \int_0^{\infty} \frac{p'(x)}{\tau_p} \cdot dx = \frac{Q_p}{\tau_p} = I$$

Beraz, junturan barreiapeneko korrontea zena birkonbinaketa elikatzeko behar den korrontetzat har daiteke. Eta hori karga / erdibizitza erlazioaz kalkula dezakegu.

Horrek honako hau esan nahi du: erregimen geldikorrean (estatikoan), diodoaren korrontea birkonbinaketarako hutsuneak injektatzen ditu katodoan.

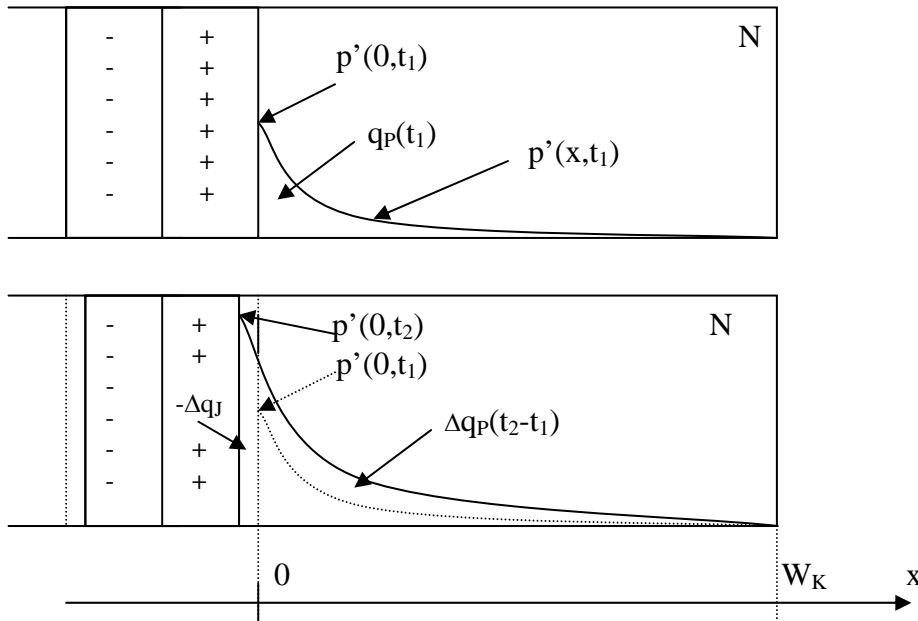
Kasu orokorrean, anodoari dagokion korronte-osagaia gehituz:

$$I = \frac{Q_p}{\tau_p} + \frac{|Q_n|}{\tau_n} = \frac{Q_p}{\tau_p} - \frac{Q_n}{\tau_n}$$

Horixe da kargaren kontrol-eredu osoa egoera estatikoan.

9.2 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera dinamikoan

p^+n diodoarekin jarraituz, demagun $v(t_1) \rightarrow v(t_2)$ trantsizioa gertatzen dela eta tentsio horiei dagokien profilen aldaketa 9.2 Irudikoa dela.



9.2 Irudia. Karga-aldaketa polarizazio zuzena handitzean

Ikusten denez, erregimen dinamikoan, kargaren kontrol-ereduak, birkonbinatzeaz gain, kargaren aldaketaren berri eman behar du. Karga-aldaketa hori korrontearen bidez lortzen denez, bi korronte-osagai daude:

- Dagoen kargak eskatzen duena (birkonbinaketarena, estatikoan bezala).
- Kargaren hazkundera behar duena: urrienen kontzentrazioaren hazkundera lortzeko injektatu beharreko karga (dq karga, dt denboran).

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t}$$

non izendapena aldatu baitugu erregimen dinamikoan gaudela adierazteko.

Junturako karga kontuan hartzen badugu:

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_I}{\partial t}$$

AURREKOA APLIKATZERAKOAN ONARTU OHI DIREN HIPOTESIAK:

1. Hustutako eskualdeko ertzetan (karga espazialeko eskualdeko ertzetan) urrienen aldiuneko kontzentrazioaren eta beren orekako kontzentrazioaren arteko erlazioa oraindik ere baliagarria da:

$$p_n(0) = p_{n0} \cdot \exp(v/V_T) \rightarrow p_n(0,t) = p_{n0} \cdot \exp(v(t)/V_T)$$

non $v(t)$ juntura ertzean dagoen tentsioa baita (normalean, aplikatutako tentsioa).

Hori, maiztasuna handiegia ez bada, zuzena da: eramaileek hustutako aldea zeharkatzeko behar duten denborak markatzen du kontzentrazioak eraldatzeko behar den denbora: $\text{luzera}/v = 10^{-4} \text{ cm} / 10^7 \text{ cm/s} = 10 \text{ ps} = \tau_t$.

2. Eramaileen profilek erregimen estatikoan jarraituko lioketen banaketa-funtzio berari jarraitzen diote (eskualde neutroetan). Hau da:

$$p'_n(x,t) = p'_n(0,t) \cdot \exp\left[-\frac{x}{L_p}\right] \quad \text{katodoa luzea bada}$$

$$p'_n(x,t) = p'_n(0,t) \cdot \left[1 - \frac{x}{W_c}\right] \quad \text{katodoa laburra bada (kont. ohm.)}$$

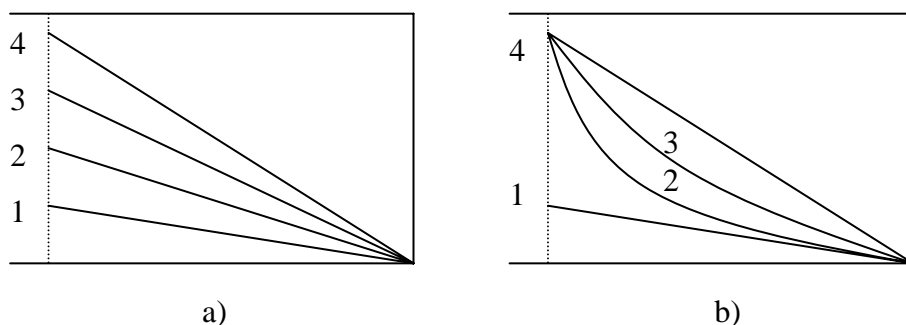
$$p'_n(x,t) = -p'_n(0,t) \cdot \text{Sh}\left[\frac{(x-W_c)}{L_p}\right] / \text{Sh}\left[\frac{W_c}{L_p}\right] \quad (\text{kontaktu ohmikoak})$$

Hau da, aldiuneko profila lortzeko behar den eramaile garraioa azkarrago gertatzen da tentsioen aldaketa baino. Une bakoitzeko egoera egoera geldikorrean bezala ebazten da. Egoera sasi-geldikor horien arteko trantsizioa geroago ikusiko dugu.

Beraz, ERREGIMEN DINAMIKOA ERREGIMEN GELDIKORREN JARRAIPEN EDO SEGIDA GISA ANALIZATZEN DUGU.

Hau ez da egia (zuzena) izango seinalearen maiztasuna oso altua bada. Diodo luzeetan, hipotesia ontzat eman daiteke seinalearen maiztasuna $< 100 \text{ kHz}$ bada. Diodo laburretan, profilen aldaketa azkarragoa izaten da eta, maiztasuna $\sim 25 \text{ Mhz}$ denean ere, hipotesia erabil daiteke. Hortik aurrera, profilek beste forma bat edukiko lukete.

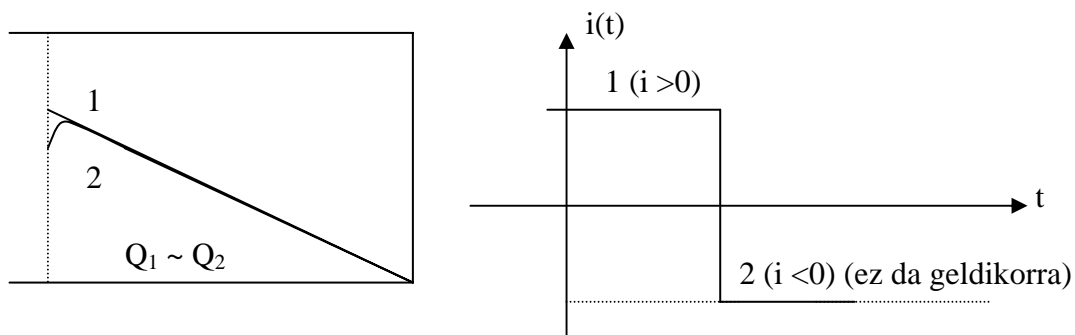
3. Kontaktuak ohmiko idealak dira eta ez dago tentsio-erorketarik eskualde neutroetan. Hori dela-eta, aplikatutako tentsio osoa junturan agertzen da. Hala ez balitz, erresistentzia bat jarri behar genuke seriean, tentsio horien berri emateko.



9.3 Irudia. a) Erregimen dinamikoa erregimen estatikoei dagozkion profilen bidez osatzea b) Tentsio-aldaketa azkarregia da: hipotesiak ez du balio

Estatikoan, $dp/dt = dn/dt = 0$ zen, eta korronteek ez zuten anodoan, katodoan eta hustutako eskualdean metatutako eramaile-kontzentrazioa (karga) handitzen. Metatutako eramaileak egoera estatiko batetik bestera aldatzen diren arren, konstante mantentzen dira egoera bakoitzean. Dinamikoan, berriz, eskualde horietan eramaileak sartu edo atera behar ditugu aldaketa hori gertatzeko. Urrienei begiratzen badiegu, polarizazio zuzena igotzen badugu, adibidez, katodoan dauden hutsuneak gehitu behar dira, hau da, horien karga gehitu egin behar da: korronte gehigarri bat behar da.

Metatutako eramaileak edo kargak aldatzeak, korronteaz gain, denbora eskatzen du. Korronteak, aldiz, (ia) berehala alda daitezke (zenbait kasutan hala gertatzen da), urrienen kontzentrazioen malden funtzioa baitira (eta maldak azkar alda daitezke).



9.4 Irudia. Korrontearen aldaketa bortitza; karga, aldiz, ez da ia aldatzen

AURREKO EKUAZIOAREN BESTE ADIERAZPEN BAT:

$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v(t))}{\partial t}$$

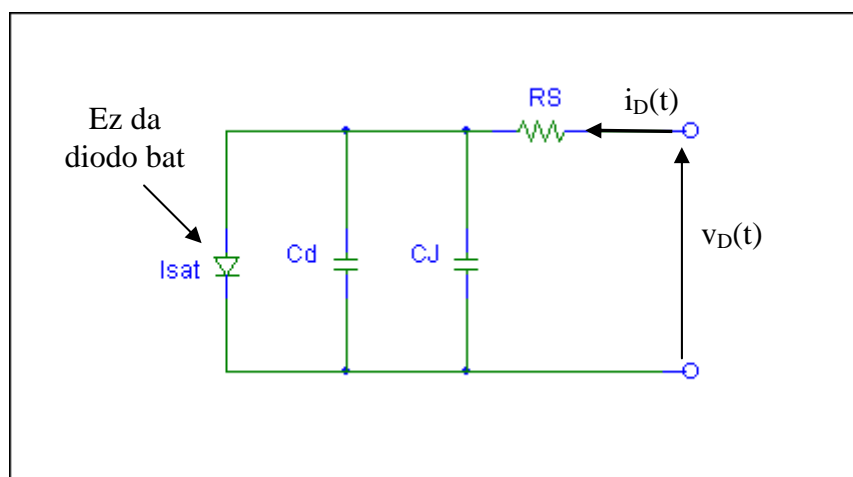
$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t}$$

$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + C_d \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} + C_J \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t}$$

$$\text{non } C_d = \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} \quad \text{eta} \quad C_J = -\frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v}$$

Osagaien esanahia:

- q_H/τ_p zatidurak egoera (sasi)geldikorreko korronea adierazten du.
- C_D barreiapeneko kapazitatea da (kondentsadoreetan bezala, eskualde neutroek tentsioa aldatzean behar duten kargaren mugimendua).
- C_J junturako kapazitatea da (hustutako eskualdeko kargaren aldaketa / tentsioaren aldaketa).



9.5 Irudia. Zirkuitu baliokidea (serieko erresistentzia ez da aintzat hartzeko modukoa izaten)

KAPAZITATEEN KALKULUA :

Eskualde neutroei dagokiona (kasu honetan, katodokoa):

$$C_d = \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} = \frac{\partial(I(v) \cdot \tau_p)}{\partial v} = \frac{\partial(I_{\text{sat}}(\exp(v/V_T) - 1) \cdot \tau_p)}{\partial v}$$

$$C_d = I_{\text{sat}} \tau_p \cdot \exp(v/V_T) / V_T = \frac{I_{\text{sat}} \cdot \exp(v/V_T)}{V_T} \cdot \tau_p$$

$$C_d = \frac{I_{\text{espero-genuena}} + I_{\text{sat}}}{V_T} \cdot \tau_p \neq \frac{I_{\text{daukaguna}} + I_{\text{sat}}}{V_T} \cdot \tau_p$$

Junturakoa:

$$C_J = -\frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v}$$

$$\text{non } \left[q_J = q_{ND} = -q_{NA} = qAN_A x_p = qAN_A \left(\frac{N_D}{N_A + N_D} l \right) \Rightarrow dq_J = \frac{qAN_A N_D}{N_A + N_D} dl \right]$$

$$\left[\phi_T - v_J = \frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)} \cdot l^2 \Rightarrow -dv_J = \frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)} \cdot 2l \cdot dl \right]$$

$$\text{gogoratu } l = \sqrt{\frac{2 \epsilon}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \cdot \sqrt{\Phi_T - V} \quad (\epsilon \text{-ren unitateak: } \frac{\text{F}}{\text{m}} = \frac{\text{C}}{\text{V} \cdot \text{m}})$$

Beraz,

$$C_J = -\frac{qA \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot dl}{-\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)} \cdot 2l \cdot dl} = \frac{A \epsilon}{l} = A \epsilon \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T - v(t)}}}}$$

Juntura latz-laua ez bada:

$$C_J = k \cdot (\phi_T - v(t))^{-1/m} = C_{J0} \cdot \left(1 - \frac{v(t)}{\phi_T} \right)^{-1/m}$$

(juntura latzetan, $m = 2$; juntura mailakatuetan, $m = 3$).

$C_J = A \epsilon / l$ A azalera duten eta l distantziara dauden bi xaflez egindako kondentsadorearen kapazitatea da. Izan ere, kargak sartze-ateratze hori, fenomeno bera da ohiko kondentsadoretan edota junturetan.

C_{J0} orekako junturako kapazitatea da.

$$C_{J0} = C_J(v=0) = -A \epsilon \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T}}$$

$$C_J(v) = -A \epsilon \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \epsilon (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T - V}} \frac{\sqrt{\phi_T}}{\sqrt{\phi_T}} = C_{J0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T / \phi_T - v(t) / \phi_T}}$$

$$C_J(v) = C_{J0} \cdot (1 - v(t) / \phi_T)^{-1/2} \rightarrow C_J(v) = C_{J0} \cdot (1 - v(t) / \phi_T)^{-1/m}$$

Normalean, $v(t) = V_D + v_d(t) \sim V_D$ polarizazioak agintzen du, eta, orduan:

$$C_J(v) = C_{J0} \cdot (1 - v(t) / \phi_T)^{-1/m} \approx C_{J0} \cdot (1 - V_D / \phi_T)^{-1/m}$$

[$v(t)/\phi_T > 0.5$ denean, aurreko ekuazioak kale egiten du eta kapazitatea askoz azkarrago hazten da]

C_J oso interesgarria da, tentsioaren bidez erraz kontrolatzen den kondentsadorea baita.

BIEN BATURA:

Polarizazio zuzenean, C_d nahiko handia da eta $C_d + C_J \sim C_d$. Polarizazio inbertsoan, berriz, $C_d \sim 0$, eta, bera, $C \sim C_J$.

ERABILERA:

- Zirkuitu integratuetan, normalean, alderantzizko polarizazioan erabiltzen da kapazitate hori, elkarren ondoan dauden dispositiboak isolatzeko.
- Alderantzizko polarizazioan, tentsioarekin aldatzen den C_J kondentsadorea dugunez, telebista eta FM (frekuentzia modulatu) aplikazioetan eta orokorrean maiztasun aldakorra duten zirkuituetan erabiltzen da. Bestela, kondentsadore doigarri bat lortzeko, atal mugikorrez egindako kondentsadorea behar litzateke.

9.3 Seinale txikiko erregimenaren analisisa: garapena eta zirkuitu baliokidea

Diodoa polarizazio zuzenean nahiko sartuta badago eta aplikatutako tentsioaren osagai aldakorra (alternoa) osagai finkoa (jarraitua, polarizaziokoa) baino askoz txikiagoa bada, seinale txikiko erregimenean egongo gara. Alegia, seinale txikiko erregimenean egoteko, $v_d(t) \ll V_T = 25.9 \text{ mV}$ (T_{ambient}).

Kasu horretan, tentsioen eta korronteen zati aldakorren arteko erlazioak linealak dira (eta ez esponenzialak / logaritmikoak edo finkoak, seinale handiekin gertatzen den bezala).

$$v_D(t) = V_D + v_d(t) \rightarrow i_D(t) = I_D + i_d(t) \text{ non } \begin{cases} I_D = I_D(V_D) \\ i_d(t) = f(V_D) \cdot v_d \end{cases}$$

Zirkuituak analizatzean, bi osagaiak (seinale handikoa -jarraitua, polarizazioa— eta seinale txikikoa —alternoa—), bakoitza bere aldetik, aztertuko ditugu eta, gero, gainezarpena aplikatuz, bi erantzunak batuko ditugu.

[Hemen ere, kargaren kontrol-eredu osoa erabil genezake, noski; baina, alternoko seinalea txikia bada, askoz errazagoa izaten da bitan banatuz ebaztea.]

Zuzenean dagoen p^+ katodo **luzeko** diodo asimetrikoaren kasua gogoratu:

$$q_H(t) = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(e^{\frac{v_D(t)}{V_T}} - 1 \right)$$

Tentsioaren bi osagaiak jarritz: $v_D(t) = V_D + v_d(t)$; non $V_D \gg V_T$

$$q_H(t) = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$q_H(t) \approx (\text{zuzenean oso sartuta gaudenez}) \approx q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T}\right)$$

$$q_H(t) = q A_J L_p p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{v_d(t)}{V_T}\right) \approx q A_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot \left[1 + \frac{v_d(t)}{V_T} \right]$$

$$q_H(t) = q A_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) + \frac{q A_J L_p p_{n0}}{V_T} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot v_d(t) = Q_H + K_1 \cdot v_d(t)$$

Beste era batean adierazita:

$$q_H(t) = Q_H + q_h(t)$$

$$\text{non } Q_H = qA_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$$

$$\text{eta } q_h(t) = \frac{qA_J L_p p_{n0}}{V_T} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot v_d(t) = \frac{Q_H}{V_T} \cdot v_d(t)$$

Dinamikoan erabili behar den kargaren kontroleko ekuaziora eramanez gero:

$$i_D(t) = \frac{q_H(v_D(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v_D(t))}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v_D(t))}{\partial t}$$

$$i_D(t) = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p} + 0 + 0 + \frac{q_h(v_d(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_h(v_d(t))}{\partial t} + 0 \quad \frac{dQ_H(v_D(t))}{dt} = 0$$

$$i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

$$I_D = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p} = qA \frac{L_p}{\tau_p} p_{n0} \exp(V_D/V_T) \quad (\text{Shockley})$$

$$i_d(t) = \frac{q_h(v_d(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_h(v_d(t))}{\partial t} = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p V_T} v_d(t) + \frac{Q_H(V_D)}{V_T} \frac{dv_d(t)}{dt} = g_d v_d(t) + C_d \frac{dv_d(t)}{dt}$$

Beraz, gainezarpena erabil dezakegu, eta, seinale txikian:

$$i_d(t) = g_d \cdot v_d(t) + C_d \cdot dv_d(t)/dt ,$$

Ikusten denez, g_d eta C_d sasi-konstanteek eroankortasun eta kondentsadore bana adierazten dute, zeren $v_d(t)$ eta haren deribatuarekiko proportzionalak diren osagaiak islatzen baitituzte.

$$\text{➤ } g_d = I_D / V_T \quad (R_d = 1/g_d)$$

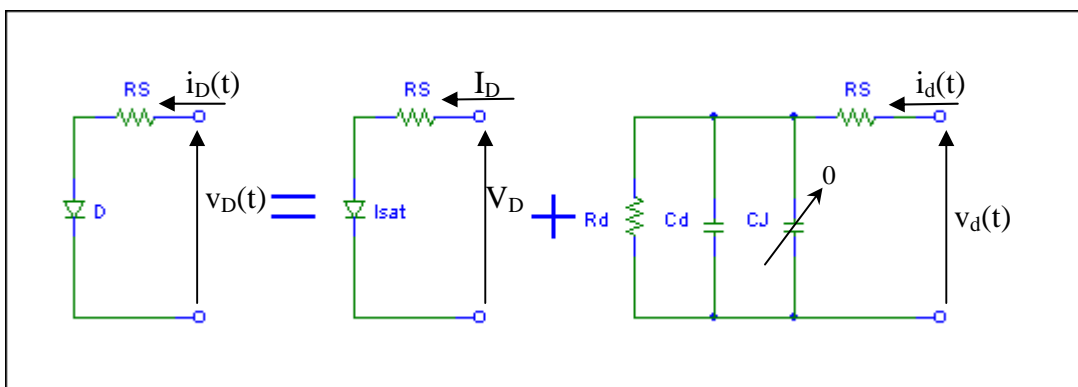
$$\text{➤ } C_d = I_D / V_T \cdot \tau_p = g_d \cdot \tau_p$$

(Azken osagai bat sar liteke, C_J paraleloan gehituz)

Kontuan izan seinale txikiko zirkuitua polarizazio-puntuaren menpe dagoela.

Beraz, diodoak dituen zirkuitu bat egoera dinamikoan analizatzerakoan, seinale txikikoa delako susmoa badugu, honako hau egin beharko dugu:

- Sarrerako seinaleak bitan deskonposatu: alde batetik, polarizazioa (seinale handia, jarraitua) eta, bestetik, seinale alternoa:
 - ◆ Seinale alternoa handia balitz, kargaren bidezko kontrol-eredua osorik erabili beharko genuke, eta aurreko banaketa alferrikakoa litzateke.
 - ◆ Normalean, aldiz, seinale alternoa txikia izaten da ($\ll 26 \text{ mV}$):
 - Seinale jarraituko (handiko) zirkuitua analizatuz, polarizazioko korrronteak eta tentsioak ebatzi.
 - Seinale txikiko zirkuitu baliokidea(k) kalkulatu. Hau da, g_d eta C_d (C_J aintzat ez hartzeko modukoa izango da) kalkulatu eta seinale alternoari dagokion zirkuitua planteatu.
 - Alternoko zirkuitua ebatzi.
 - Seinale handiko eta txikiko erantzunak batu.



9.6 Irudia. *Seinale txikiko zirkuitu baliokidea (serieko erresistentzia aintzat ez hartzeko modukoa izaten da)*

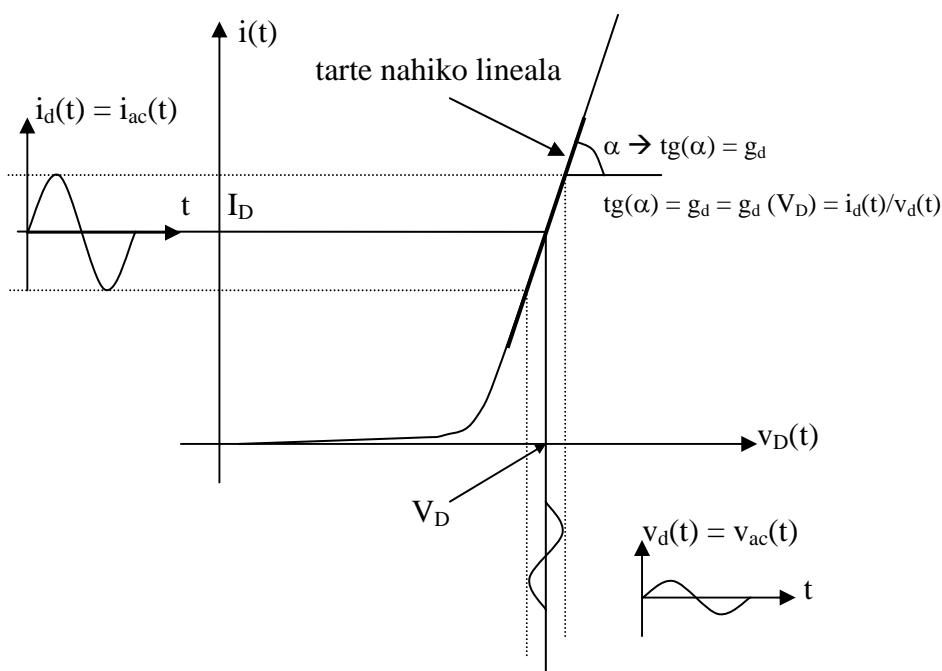
Seinale txikiko zirkuituko osagai guztiak linealak dira.

Dakigunez –Fourieren teorema eta deskonposaketa-, seinale alternoak seinale sinusoidalen batuketaren bidez adieraz daitezke, eta segida hori oso esanguratsua da maiztasunaren eremuan. Horrenbestez, oso interesgarria da hainbeste erabiltzen diren seinale sinusoidalen kasua analizatzea:

$$v_d = V_{dm} \exp(j\omega t) \rightarrow i_d = V_{dm} \cdot \exp(j\omega t) \cdot [g_d + j\omega C_d]$$

Ikusten denez, defasatu eta ahuldu egin daiteke, baina korronteak tentsioaren forma du eta horien bidez egindako zirkuituen irteerek sarreraren forma / itxura bera izango dute (seinaleak sinusoidalak badira). Maiztasun oso baxuen kasua berezia eta interesgarria da. Orduan, $\omega C_d \ll g_d$, eta $i_d(t) = g_d \cdot v_d(t)$ (beraz, kasu horretan ez da desfaserik gertatzen).

g_d eroankortasuna, $i = i(v)$ zuzenaren malda denez, grafikoki adieraz dezakegu:



9.7 Irudia. Seinale txikiko korrontea grafikoki ebaztea maiztasun baxuetan

Bakarrik seinale txikiekin eta maiztasun oso baxuetan aplikatzen den azken emaitza horretara iristeko, bide laburragoa eta errazagoa dugu, Shockleyren ekuazioa aplikagarria dela onartuta:

$$i_D(t) = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{v_D(t)}{V_T}\right) - 1 \right) = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$i_D(t) \approx (\text{zuzenean}) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T}\right) = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{v_d(t)}{V_T}\right)$$

$$i_D(t) \approx \left(\frac{v_d(t)}{V_T} \ll 1 \right) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot \left[1 + \frac{v_d(t)}{V_T} \right]$$

$$i_D(t) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) + I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot \frac{v_d(t)}{V_T} = I_D + i_d(t)$$

$$\text{Non } I_D = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$$

$$i_d(t) = g_d \cdot v_d(t) \quad g_d = \frac{I_{sat}}{V_T} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) = \frac{I_D}{V_T}$$

9.4 Diodoaren portaera konmutazioan

ETENGAILUEN EZAUGARRIA

Dakigunez, etengailu batek, korronteari pasatzen uzten dio ON egoeran, ia erresistentziarik jarri gabe. OFF egoeran dagoenean, aldiz, ez dio korronteari pasatzen uzten, tentsioa altua bada ere. Lehenengo kasuan, zirkuitulaburra eta, bigarrenetan, zirkuitu irekia da, beraz. Diodoen ezaugarriarekin antza handia duenez, horiek ere noranzko bakar bateko etengailu gisa erabil daitezke.

Hori dela eta, askotan, diodoa konmutadore elektriko gisa erabiltzen da, eta korrante- edo tentsio-pultsu bat aplikatzen zaio: diodoa OFF (etenik) egoeratik ON (eroaten) egoerara igarotzen da -edo alderantziz-.

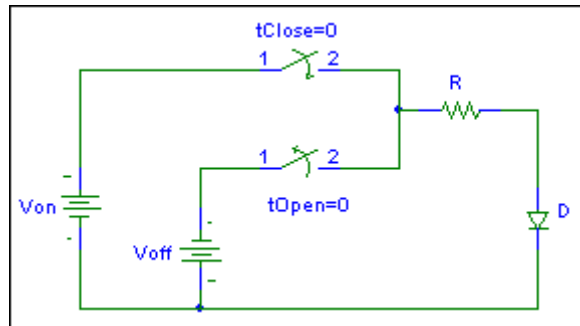
Zirkuitu horietan -bertan erabiliko diren diodoetan-, konmutazioaren abiadura funtsezkoa da.

Horregatik, konmutazio-denborak aztertuko ditugu: OFF → ON (eroapenerako aldaketa) trantsiziotik hasiko gara eta ON → OFF (eteterako aldaketa) ikusiko dugu geroago. Bide horretan, konmutazio-denboren osagaiak definituko dira.

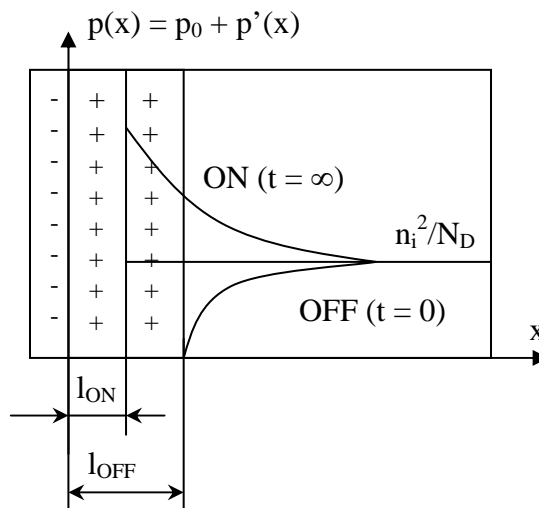
9.4.1 EROATEN HASTEAN (OFF → ON)

$t = 0^-$ denean, egoera geldikorrean gaude eta diodoa etenik dago: korrontea $i_D = -I_{sat}$ eta tentsioa $v_D = -V_R$ dira. Karga espazialeko eskualdea nahiko zabala da (orekarekin alderatuta), eta junturako ertzean ez dago urrienik.

$t = 0^+$ denean, zirkuitua aldatzen dugu (kanpoko etengailu baten bidez). Handik denbora luzera ($t = \infty$), egoera geldikorrera iritsiko gara eta, orduan, tentsioa ($v_D \sim 0.7 \text{ V}$) eta korrontea ($i_D = I_F$) positiboak izango dira. Karga espazialeko eskualdea laburragoa izango da (orekako zabalera izango du, gutxi gorabehera) eta urrienen kontzentrazioa asko handituko da eskualde neutroetan.



9.8 Irudia. $t = 0$ unean gertatzen den aldaketa



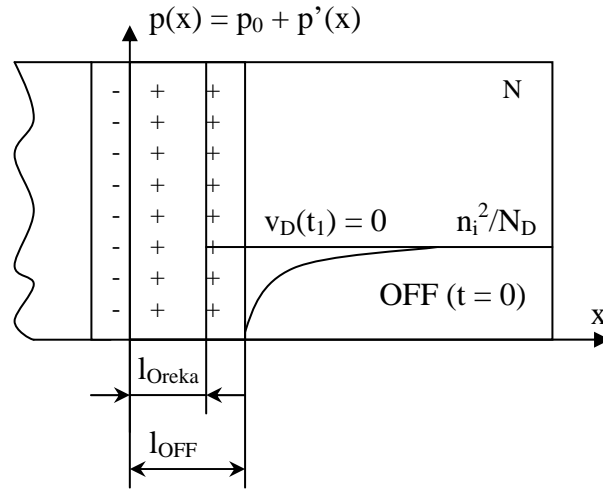
9.9 Irudia. $t = 0$ eta $t = \infty$ uneetan izango diren profilak

Beraz, lehenik eta behin, hustutako eskualdeko karga murriztu egin behar da. Murriztu ahala, tentsio negatiboaren balio absolutua jaitsiz joango da, zero izan arte. Karga espazialeko eskualdeak aldatzeko jartzen duen inertzia C_J kondentsadorearen bidez azaltzen dugu. (C_J , tentsioarekin, aldatuz doa).

Etaparen hasieran, $v_D(0) = -V_{OFF}$ eta $i_D(0) = (V_{ON} - v_D)/R = (V_{ON} + V_R)/R$

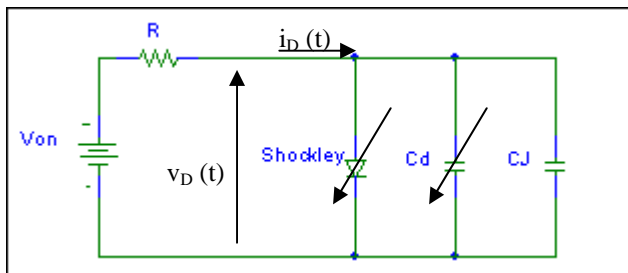
Bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON} - v_D)/R = V_{ON}/R$ (t_1 laburra izaten da)

Korronteak, junturako inguruetan karga sartu, besterik ez du egiten.



9.10 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea

$$i_D(t) = \frac{q p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx -\frac{\partial q_J}{\partial t} = C_J \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{V_{ON} - v}{R}$$



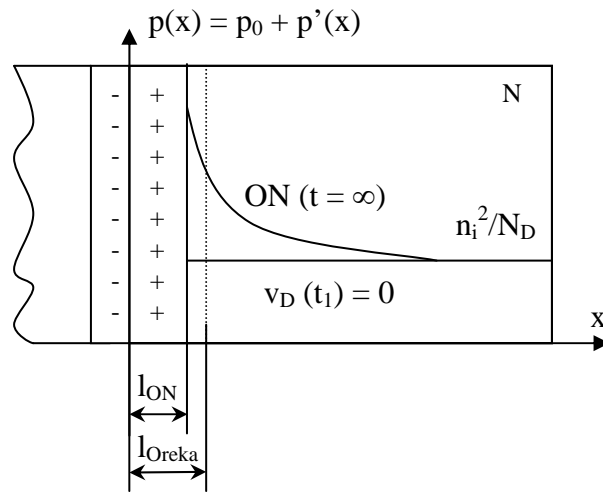
$$-V_{OFF} < v_D(t) < 0$$

$$(V_{ON} + V_{OFF})/R < i_D(t) < V_{ON}/R$$

9.11 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzeari dagokion zirkuitua

Hortik aurrera, eskualde neutroetako karga handitu egin beharko da (C_d kargatu beharko da, kontuan hartuz kondentsadore honen balioa aldakorra dela. Etapa horren hasieran $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON} - v_D)/R = V_{ON}/R$ esan bezala, eta bukaeran $v_D(t_2) \sim 0.7$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON} - v_D)/R \sim V_{ON}/R$.

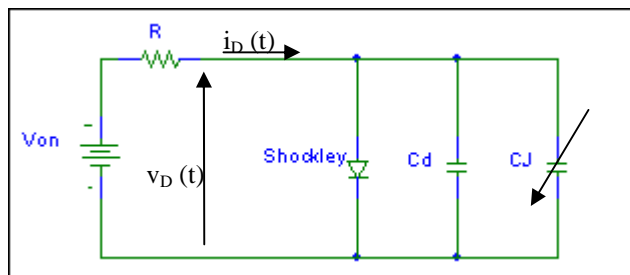
Orain, korronteak, eskualde neutroetako karga handitzeaz gain, karga mantendu ere egin beharko du (birkonbinaketa elikatuz).



9.12 Irudia. Eskualde neutroetako karga handitzea (birkonbinaketa mantenduz)

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} = I_{sat} [\exp(v/V_T) - 1] + C_d \cdot \frac{dv}{dt} \approx \frac{V_{ON}}{R}$$

C_J -ren efektua baztertuko dugu: hustutako eskualdea estutzea ez da kontuan hartzekoa korronteari dagokionez.



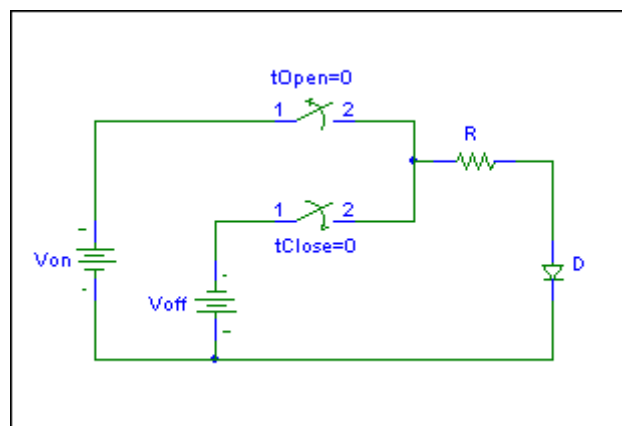
$$0 < v_D(t) < 0.7 \text{ V} \\ i_D(t) \sim V_{ON}/R$$

9.13 Irudia. Eskualde neutroetako urrienen karga handitzeari dagokion zirkuitua

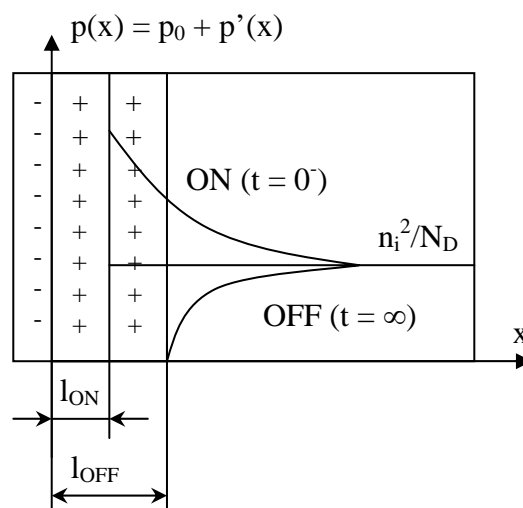
9.4.2 ETETEAREN ANALISIA (ON→OFF)

$t = 0^-$ denean, diodoa errotan ari da, egoera geldikorrean; korronea $i_D = I_F$ eta tentsioa $v_D \sim 0.7 \text{ V}$ dira. Karga espazialeko eskualdea ia orekako da eta urrienen soberakina handia da (batez ere junturako ertzean).

$t = 0^+$ denean, zirkuitua aldatzen da. Handik denbora batera, egoera geldikorrera iristean, tentsioa negatiboa izango da ($v_D \sim -V_R$) eta korronea negatiboa, baina ia nulua izango da ($i_D = -I_{\text{sat}}$). Orduan, karga espazialeko eskualdea zabalagoa izango da eta eskualde neutroetan ez da ia urrienik izango.



9.14 Irudia. $t = 0$ unean gertatzen den zirkuitu aldaketa



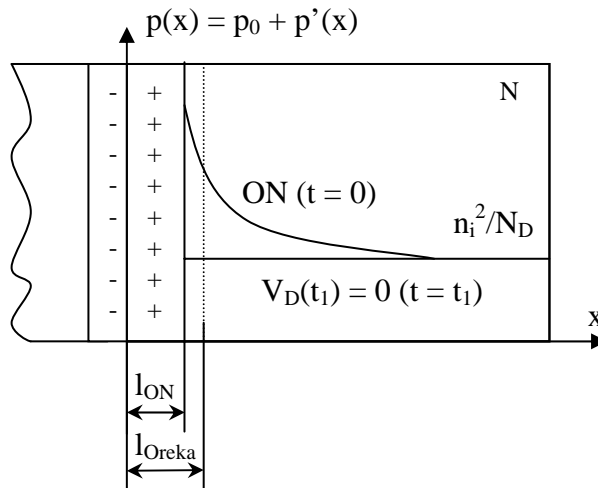
9.15 Irudia. Bi egoera geldikorrei ($t = 0^-$ eta $t = \infty$ uneei) dagozkien profilak

Beraz, lehenik eta behin, eskualde neutroetako karga murriztu egin beharko dugu. (C_d kondentsadore aldakorra deskargatuz).

Etaparen hasieran, $v_D(0) \sim 0.7$ eta $i_D(0) = (-V_{OFF} - v_D)/R \sim -V_{OFF}/R$

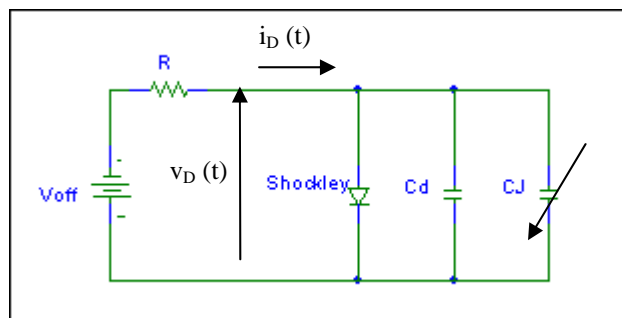
Eta, bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = -V_{OFF}/R$

Korronteak, eskualde neutroetako karga murrizteaz gain, aldiuneko karga mantendu ere egin behar du (birkonbinaketa elikatuz).



9.16 Irudia. Eskualde neutroetako karga murrizten (birkonbinaketa mantenduz)

$$i_D(t) = \frac{q p}{\tau_p} + \frac{\partial q p}{\partial t} - \frac{\partial q_I}{\partial t} \approx \frac{q p}{\tau_p} + \frac{\partial q p}{\partial t} = I_{sat} [\exp(v/V_T) - 1] + C_d \cdot \frac{dv}{dt} \approx \frac{V_{OFF}}{R}$$



$$0.7 > v_D(t) > 0$$

$$i_D(t) \sim -V_{OFF}/R$$

9.17 Irudia. Aurreko aldatari dagokion zirkuitua

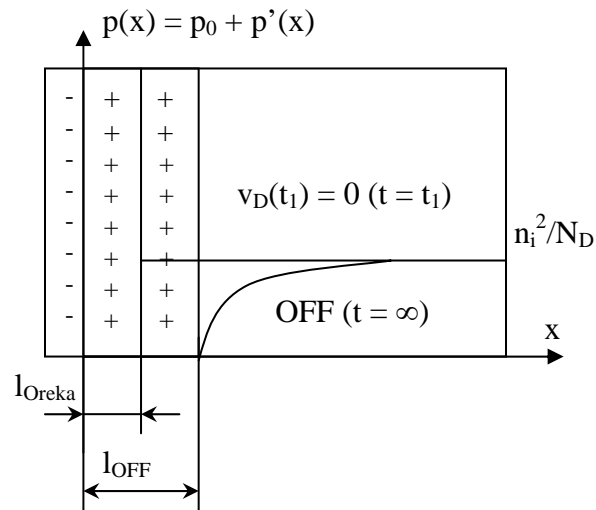
Jarraian, hustutako eskualdeko karga handitu egin behar da, eskualdea zabalduz eta inbertsoko tentsioa igoz (C_J kondentsadore aldatorra kargatuz).

Etaparen hasieran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = -V_{OFF}/R$

Bukaeran, $v_D(t_2) = -V_R$ eta $i_D(t_2) = -I_{sat} \sim 0$.

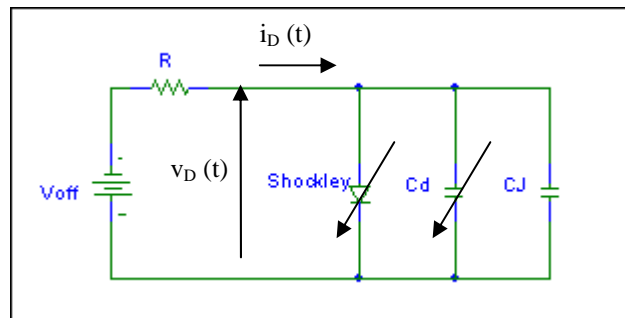
Normalean, $t_2 - t_1$ denbora laburra izaten da.

Korronteak junturako gunean karga sartu besterik ez du egiten.



9.18 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea

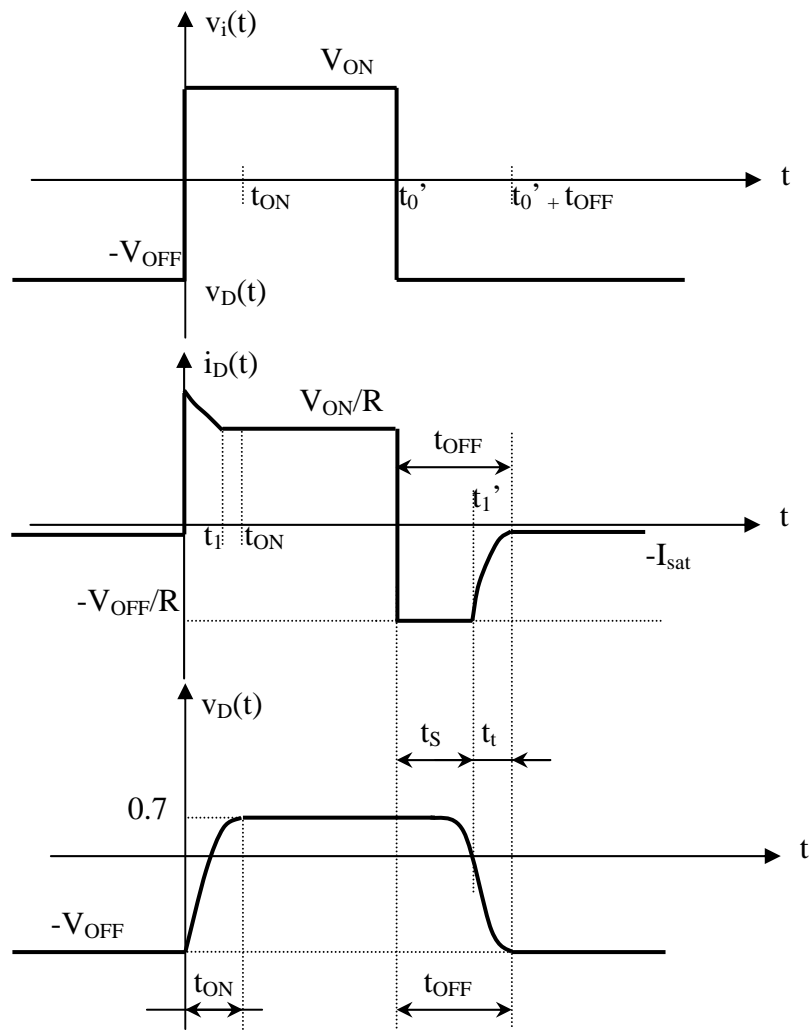
$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx -\frac{\partial q_J}{\partial t} = C_J \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{V_{ON} - v}{R}$$



$$0 > v_D(t) > -V_{OFF}$$

$$-V_{OFF}/R > i_D(t) > -I_{sat}$$

9.19 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzeari dagokion zirkuitua



9.20 Irudia. Korronteak eta tentsioak OFF \rightarrow ON eta ON \rightarrow OFF trantsizioetan

