



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ - NAPOCA

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ



Ș. L. dr. ing. *Pintilie Lucian - Nicolae*

Tehnici de control și estimare în acționări electrice

Ședința de laborator și proiect nr. 1

Noțiuni introductive

Cuprins

- ✓ **Reglarea în timp real a parametrilor de funcționare**
- ✓ **Sisteme de calcul care pot asigura procesarea în timp real**
- ✓ **Domenii de aplicabilitate ale procesării în timp real**
- ✓ **Soluționarea problemelor în Inginerie Electrică**
- ✓ **Medii de simulare, testare și programare**
- ✓ **Principalele strategii de control utilizate în domeniul Ingineriei Electrice**
- ✓ **Exemple de aplicații practice ale strategiilor de control uzuale**
- ✓ **Mijloace fizice (eng. hardware) necesare în vederea implementării strategiilor de control**
- ✓ **Mijloace logice (eng. software) necesare în vederea implementării strategiilor de control**

Procesarea în timp real a parametrilor de funcționare

- ❖ Presupune executarea unei **sarcini de lucru** (a unei aplicații) de către un sistem de calcul **într-un anumit interval de timp** cuantificabil ca și durată (ex. milisecunde, secunde). Câteva exemple de aplicații ar fi:
 - ✓ Achiziția de date (ex. monitorizarea parametrilor rețelei electrice)
 - ✓ Generarea semnalelor de comandă (ex. acționarea mașinilor electrice)
 - ✓ Interacțiunea cu procesul fizic (ex. reglarea temperaturii în incintă)
 - ✓ Schimbul de date între echipamente digitale (ex. protocoale de comunicație)

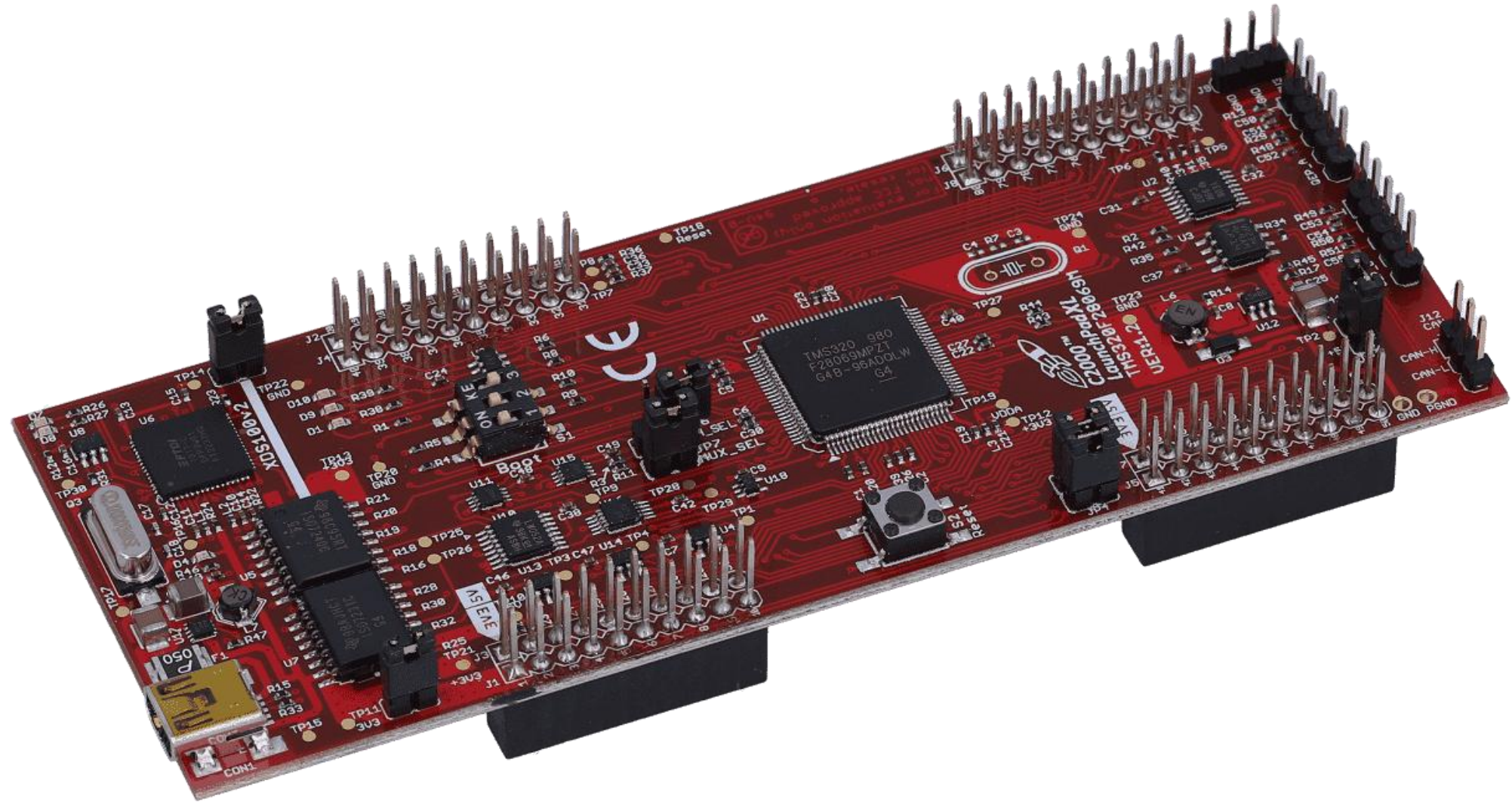
Sisteme de calcul care pot asigura procesarea în timp real

- ❖ Principalele categorii de sisteme de calcul, care pot îndeplini criteriul de „răspuns în timp real” sunt:
 - ✓ Micro-controllerele specializate
 - ✓ Procesoarele digitale de semnal
 - ✓ Microprocesoarele încorporate
 - ✓ Sistemele reconfigurabile hibride pe bază de arii de porți programabile și microprocesor de aplicație (eng. System on a Chip – SoC + Field Programmable Gate Array – FPGA)

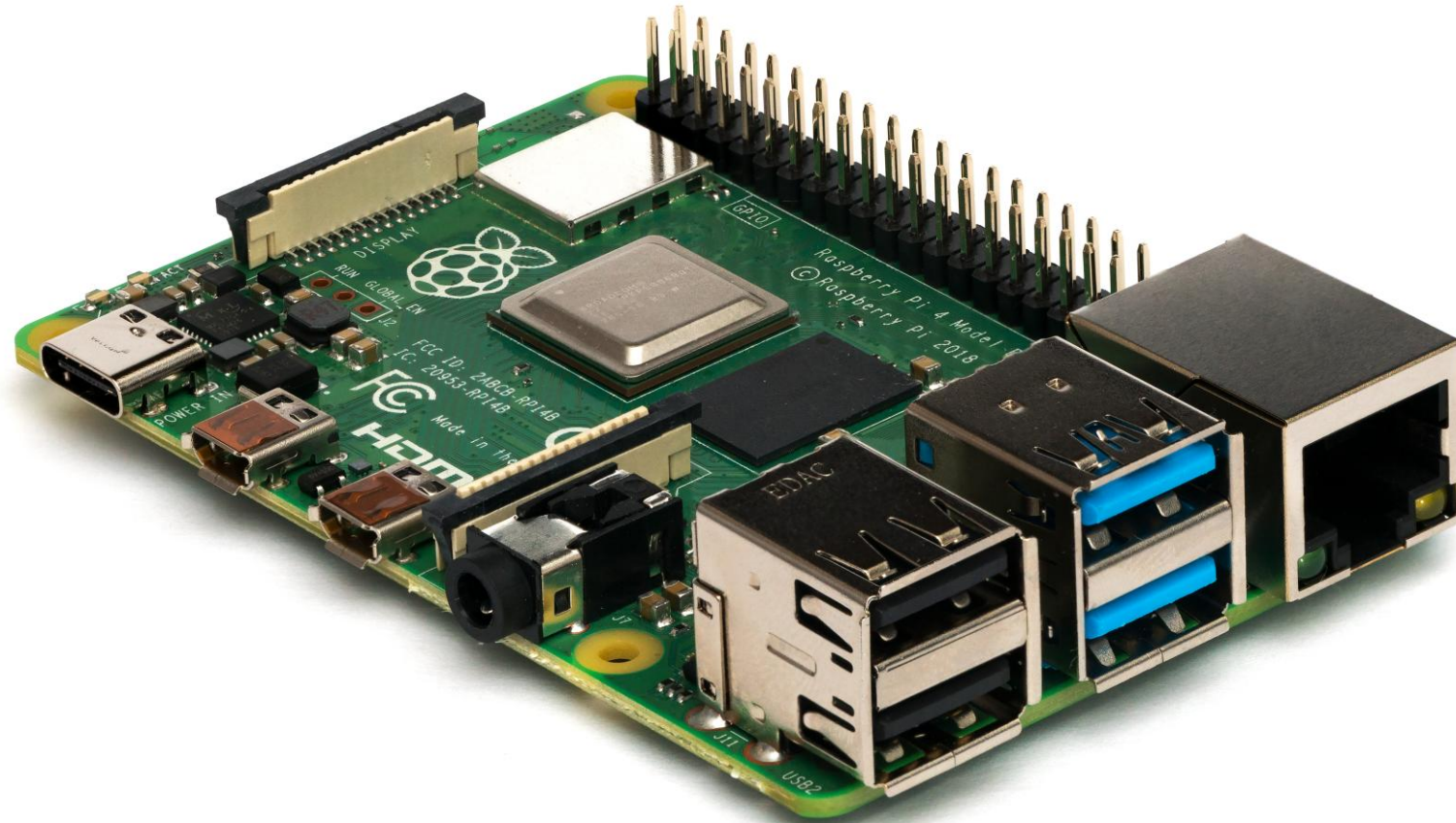
Micro-controllerele specializate – STM 32 Nucleo



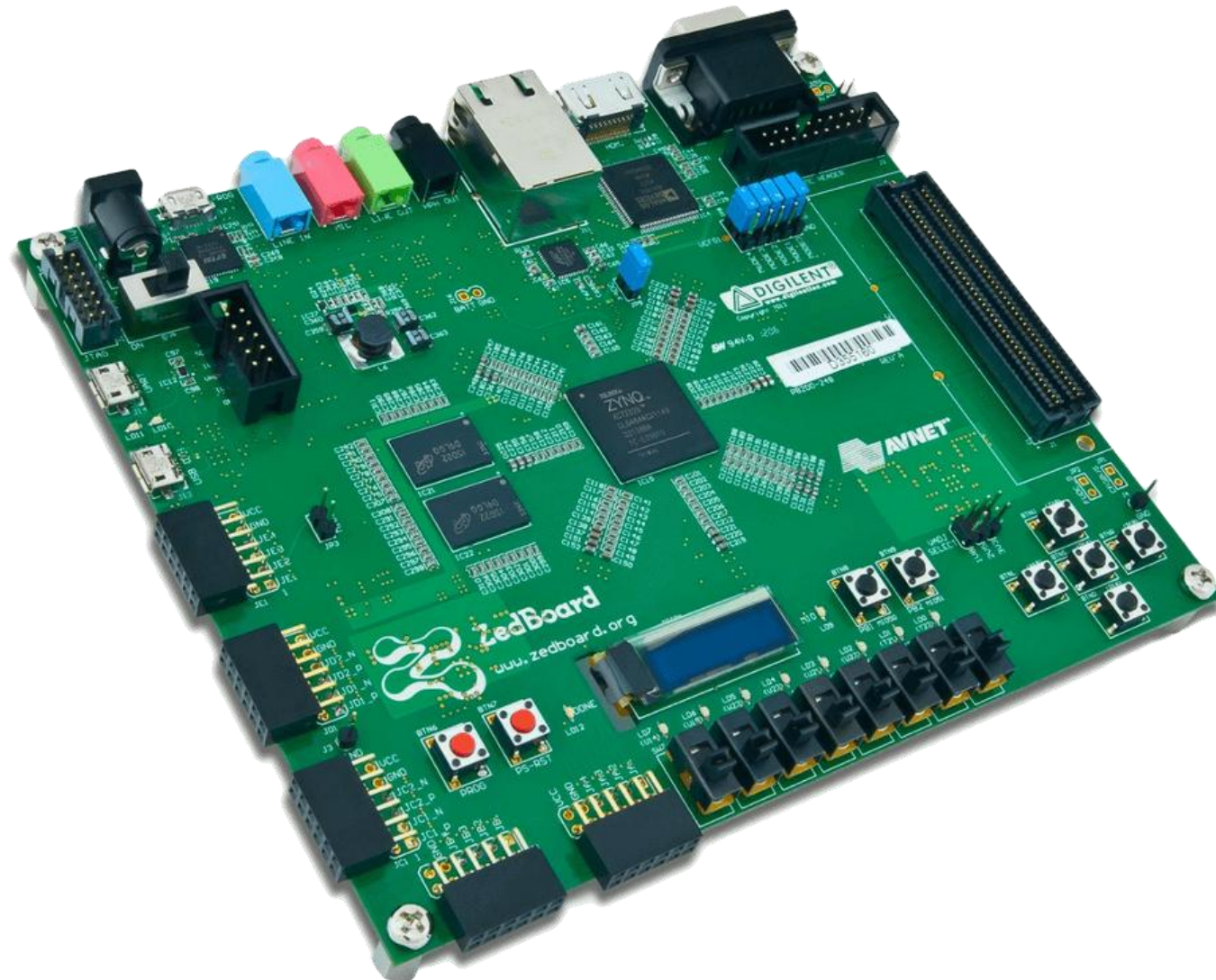
Procesoarele digitale de semnal – Texas Instruments F28069M



Microprocesoarele încorporate – Raspberry PI 4 B



Sistemele reconfigurabile hibride pe bază de arii de porți programabile și microprocesor de aplicație Xilinx Zynq 7000 ZedBoard



Sisteme de calcul care pot asigura procesarea în timp real

❖ Principalele categorii de sisteme de calcul, care pot îndeplini criteriul de „răspuns în timp real” sunt:

Sistem de calcul	Aplicația deservită
Micro-controllerele specializate	Interfațarea proceselor
Procesoarele digitale de semnal	Calculul rapid al buclelor de reglare, achiziția și procesarea de semnal, lucrul cu matrici și șiruri
Micro-procesoarele încorporate	Protocoale de comunicație
Sistemele reconfigurabile pe bază de arii de porți programabile	Rezolvarea problemelor decizionale ultra – rapide, procesarea unui volum mare de date

Domenii de aplicabilitate ale procesării în timp real

- ❖ Sistemele și soluțiile de calcul și procesare în timp real pot fi regăsite în următoarele domenii:
- ✓ Aplicații din domeniul medical
- ✓ Aplicații din domeniul telecomunicațiilor
- ✓ Aplicații din domeniul mass-media
- ✓ Aplicații de supraveghere și control al procesului industrial

Aplicații din domeniul medical – EKG digital



Aplicații din domeniul telecomunicațiilor – Platformă de dezvoltarea aplicațiilor specifice telecomunicațiilor



Aplicații din domeniul mass-media – Mixer video



Aplicații de supraveghere și control al procesului industrial – Automate programabile



Soluționarea problemelor în Inginerie Electrică

- ❖ Problemele din domeniul Ingineriei Electrice pot fi împărțite în mai multe categorii precum:
- ✓ Probleme de interfațare (ex. interacțiune cu procesul)
- ✓ Probleme de comandă și control (ex. acordarea regulatorului)
- ✓ Probleme statistice (ex. obținerea unui optim de funcționare)
- ✓ Probleme de condiționare, calibrare și scalare (ex. procesarea digitală a semnalului)

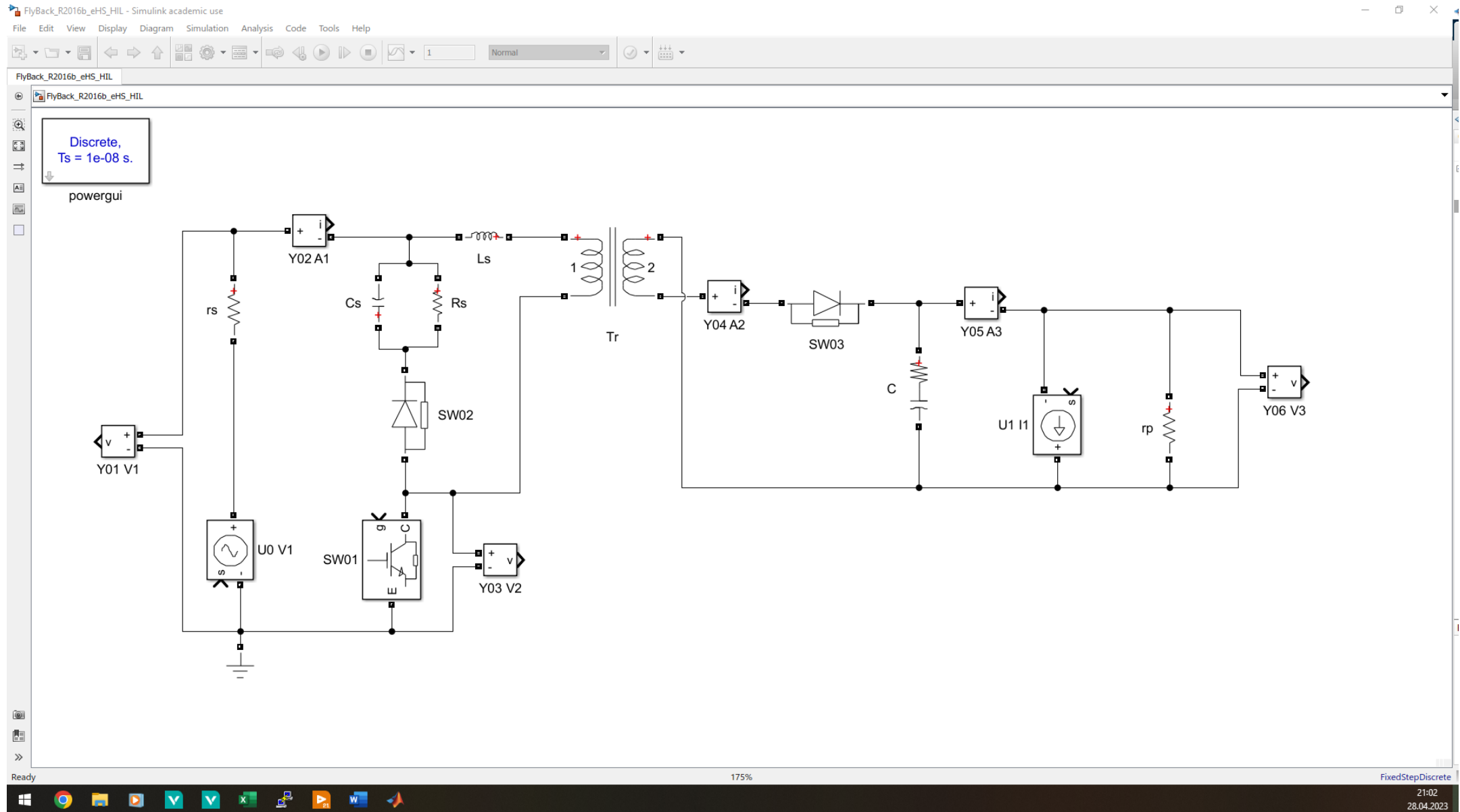
Soluționarea problemelor în Inginerie Electrică

- ❖ Soluționarea poate fi realizată prin mai multe metode și procedee matematice, numerice, statistice sau de programare precum:
 - ✓ Metode pe bază de ecuații diferențiale
 - ✓ Metode pe bază de funcții de transfer
 - ✓ Metode pe bază de matrici de stare
 - ✓ Metode și algoritmi de procesare pe bază de rețele neuronale
 - ✓ Metode și algoritmi pe bază de logică Fuzzy

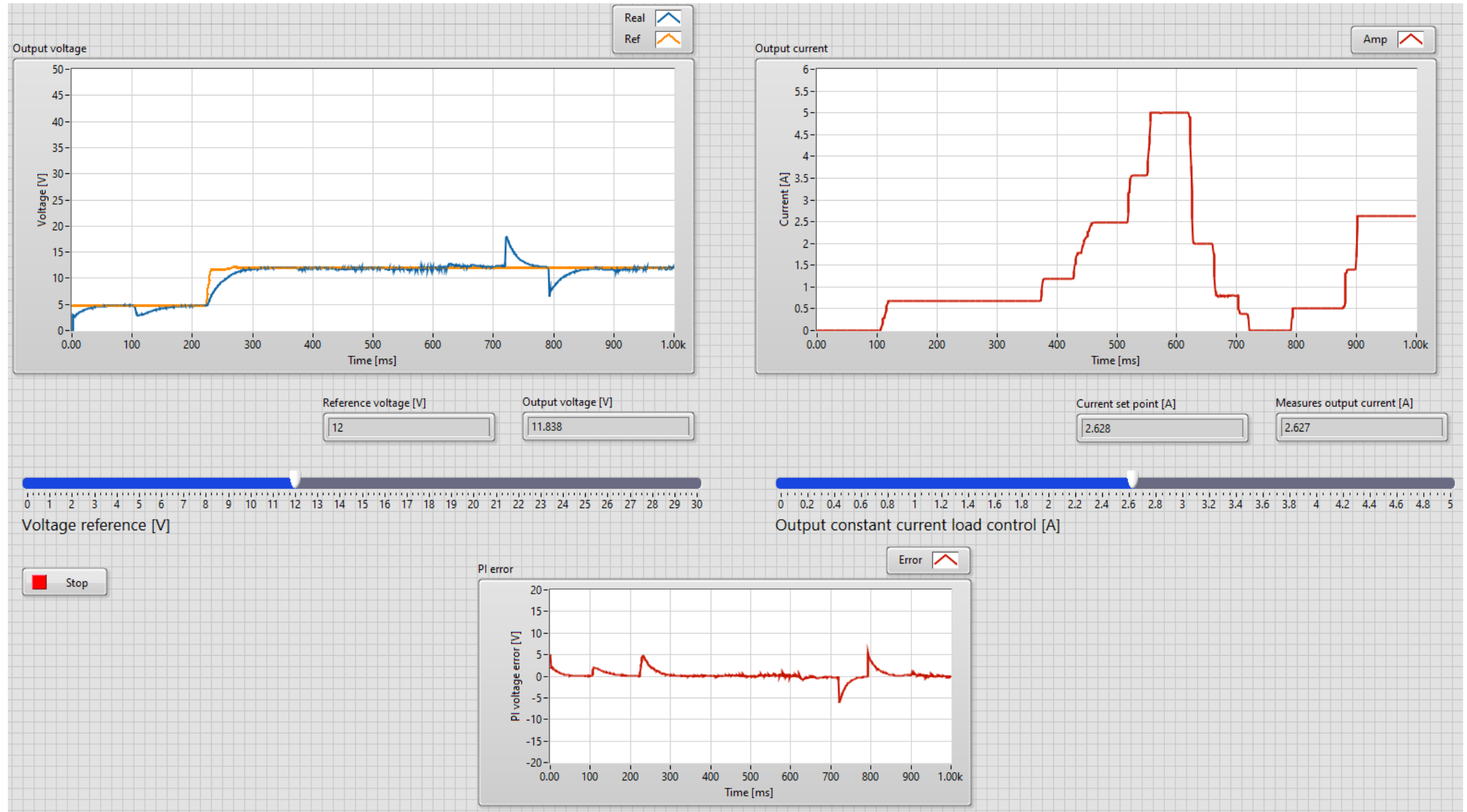
Medii de simulare, testare și programare

- ❖ În vederea soluționării unor astfel de probleme, se propune utilizarea unor medii specializate de simulare și testare având funcții specializate pentru generare automată de cod. Câteva exemple de astfel de programe ar fi:
- ✓ MathWorks Matlab – Simulink + SimScape / SimPowerSystems
- ✓ National Instruments LabVIEW FPGA + VeriStand
- ✓ Altair Embed / SolidThinking / VisSim
- ✓ PLECS Plexim Real - Time

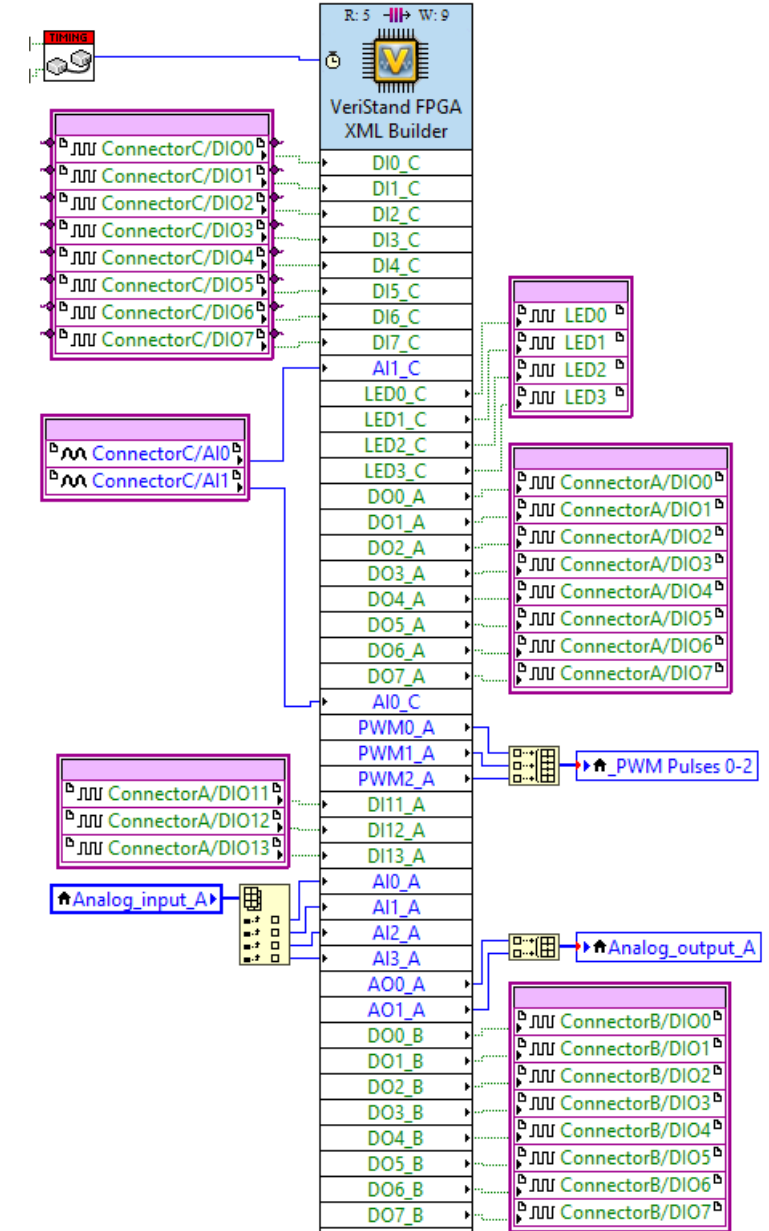
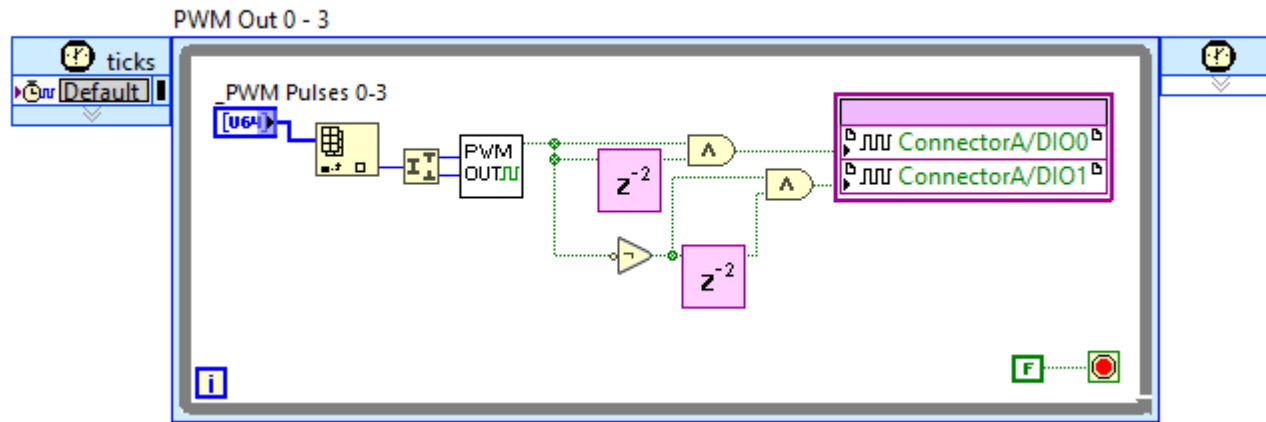
MathWorks Matlab – Simulink - SimPowerSystems



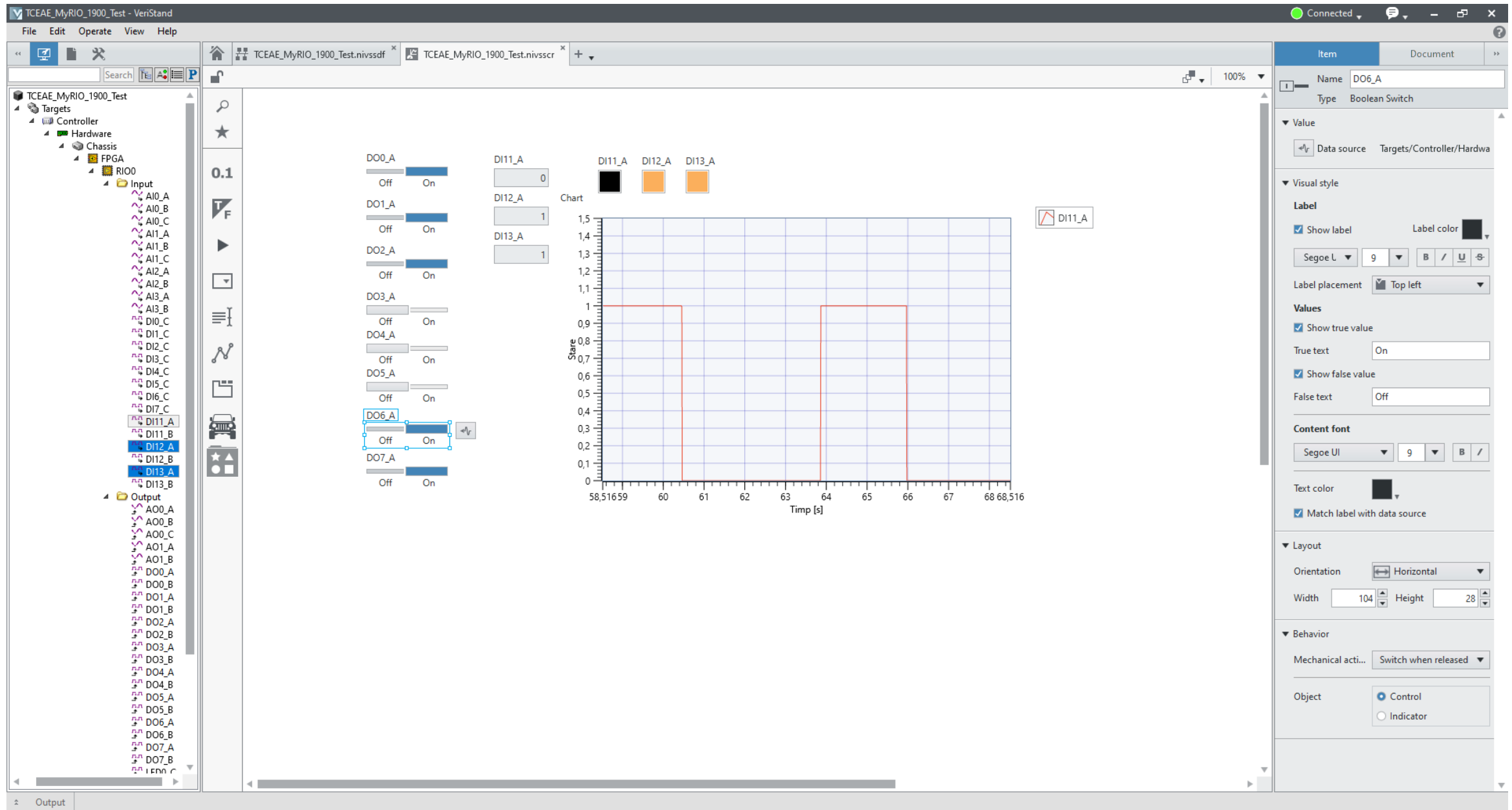
National Instruments LabVIEW – Front Panel



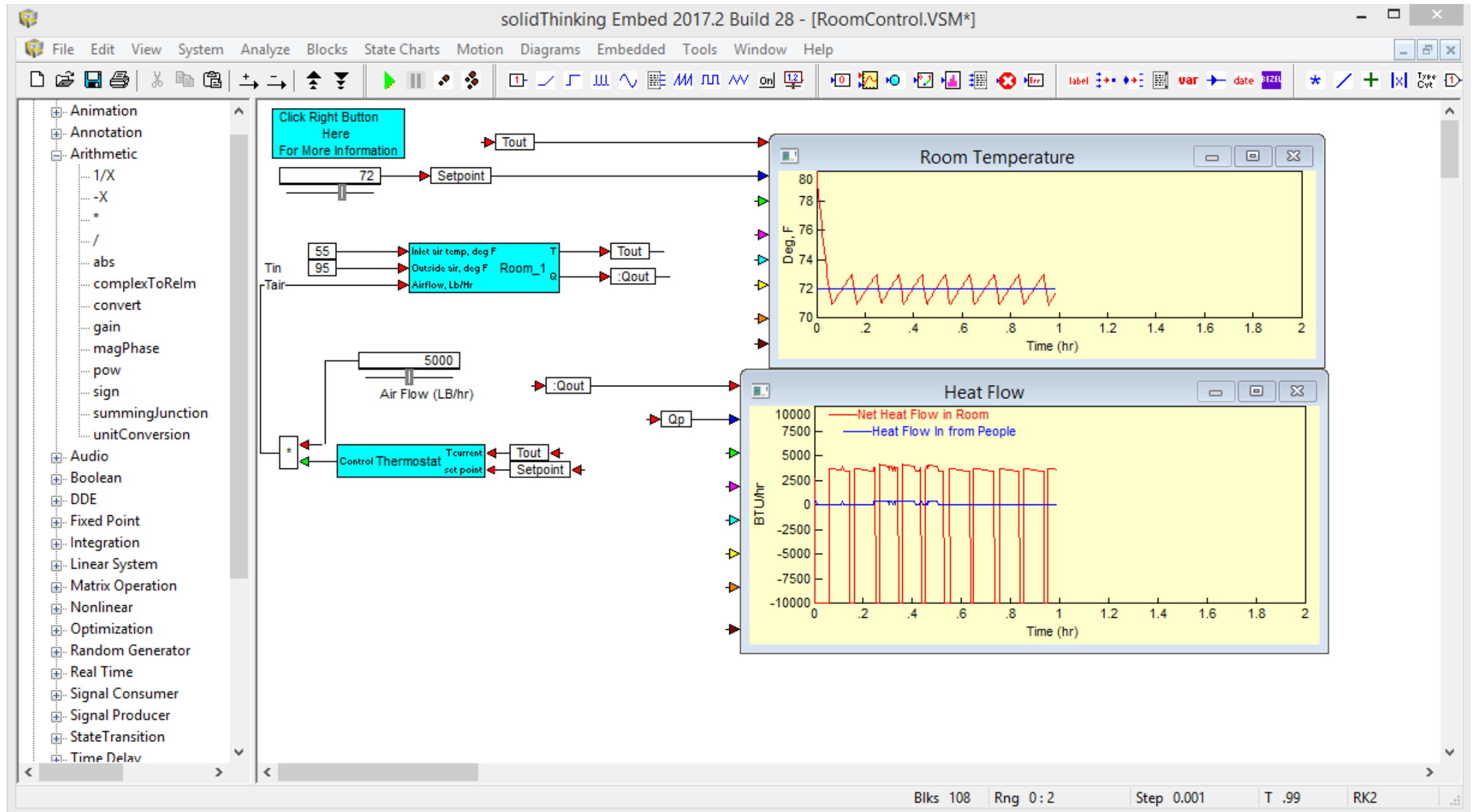
National Instruments LabVIEW FPGA – Block Diagram



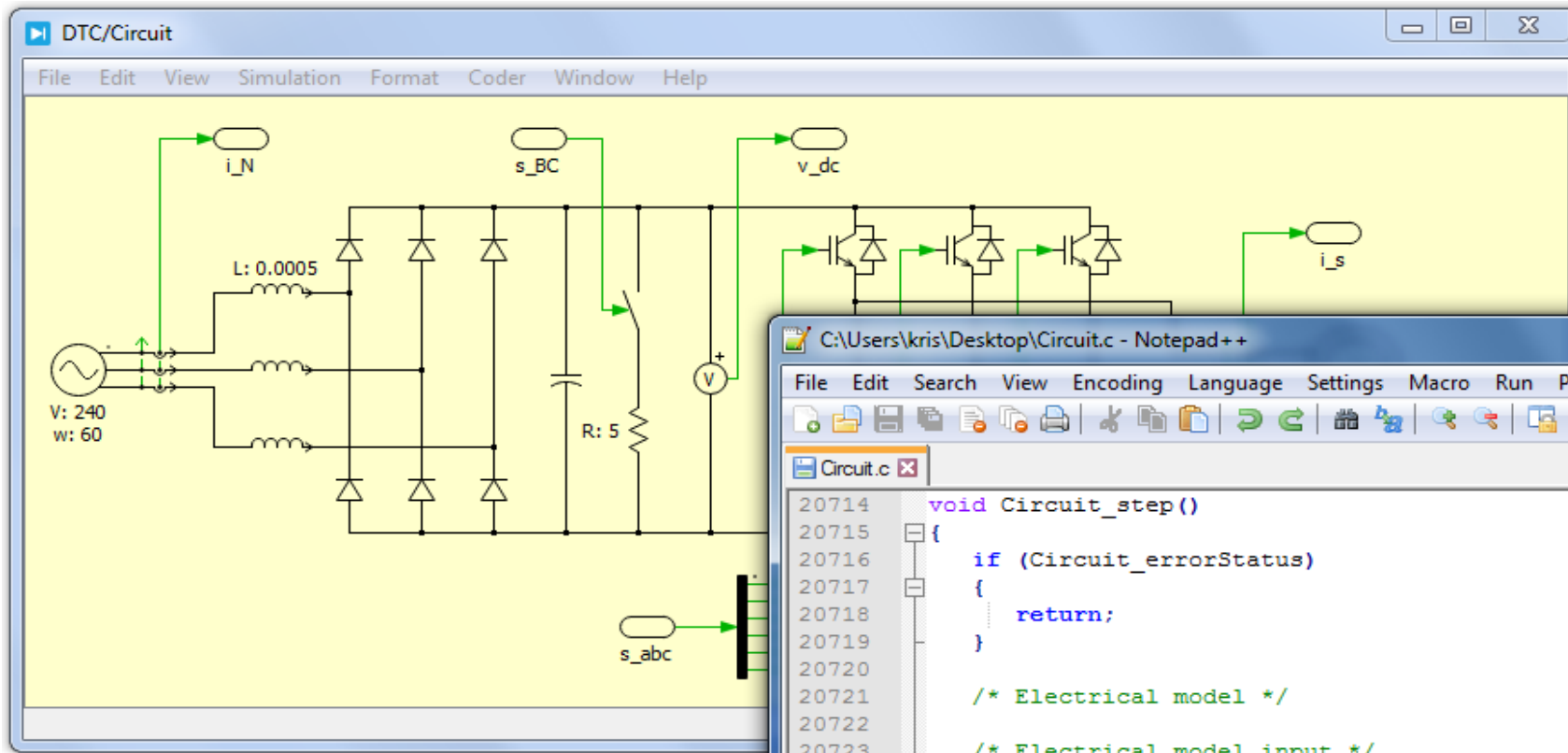
National Instruments VeriStand - DashBoard



Altair Embed / SolidThinking Embed / VisSim



Plexim PLECS



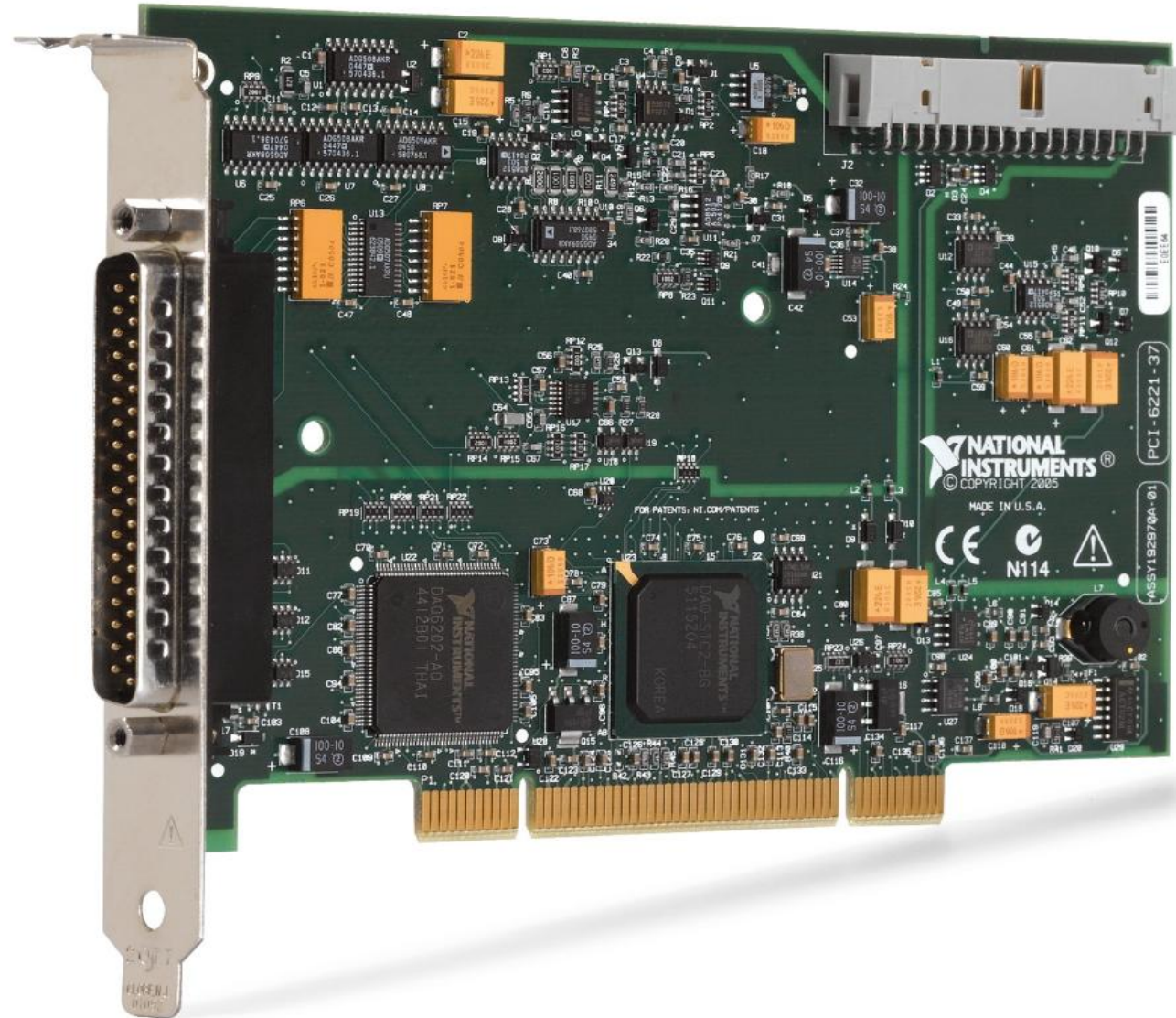
```
C:\Users\kris\Desktop\Circuit.c - Notepad++
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?
Circuit.c
20714 void Circuit_step()
20715 {
20716     if (Circuit_errorStatus)
20717     {
20718         return;
20719     }
20720
20721     /* Electrical model */
20722
20723     /* Electrical model input */
20724     /* Voltage Source DC : 'Circuit/Vdc' */
20725     Circuit_PMO_u[0]=120.;
20726     /* Voltage Source AC (3 phase) : 'Circuit/V_3ph' */
20727     Circuit_PMO_u[1]=170. * sin(3.14159265358979312 * Circuit_D_uint32_t[0] +
20728                                0.);
20729     /* Voltage Source AC (3 phase) : 'Circuit/V_3ph' */
20730     Circuit_PMO_u[2]=170. * sin(3.14159265358979312 * Circuit_D_uint32_t[1] +
20731                                -2.09439510239319526);
20732     /* Voltage Source AC (3 phase) : 'Circuit/V_3ph' */
20733     Circuit_PMO_u[3]=170. * sin(3.14159265358979312 * Circuit_D_uint32_t[2] +
20734                                2.09439510239319526);
20735     /* End of electrical model input */
```

length : 636079 lines : 20822 Ln: 20713 Col: 2 Sel: 0 | 0 Dos\Windows UTF-8 INS

Integrarea sistemelor de calcul în mediul de simulare, programarea și testare National Instruments LabVIEW

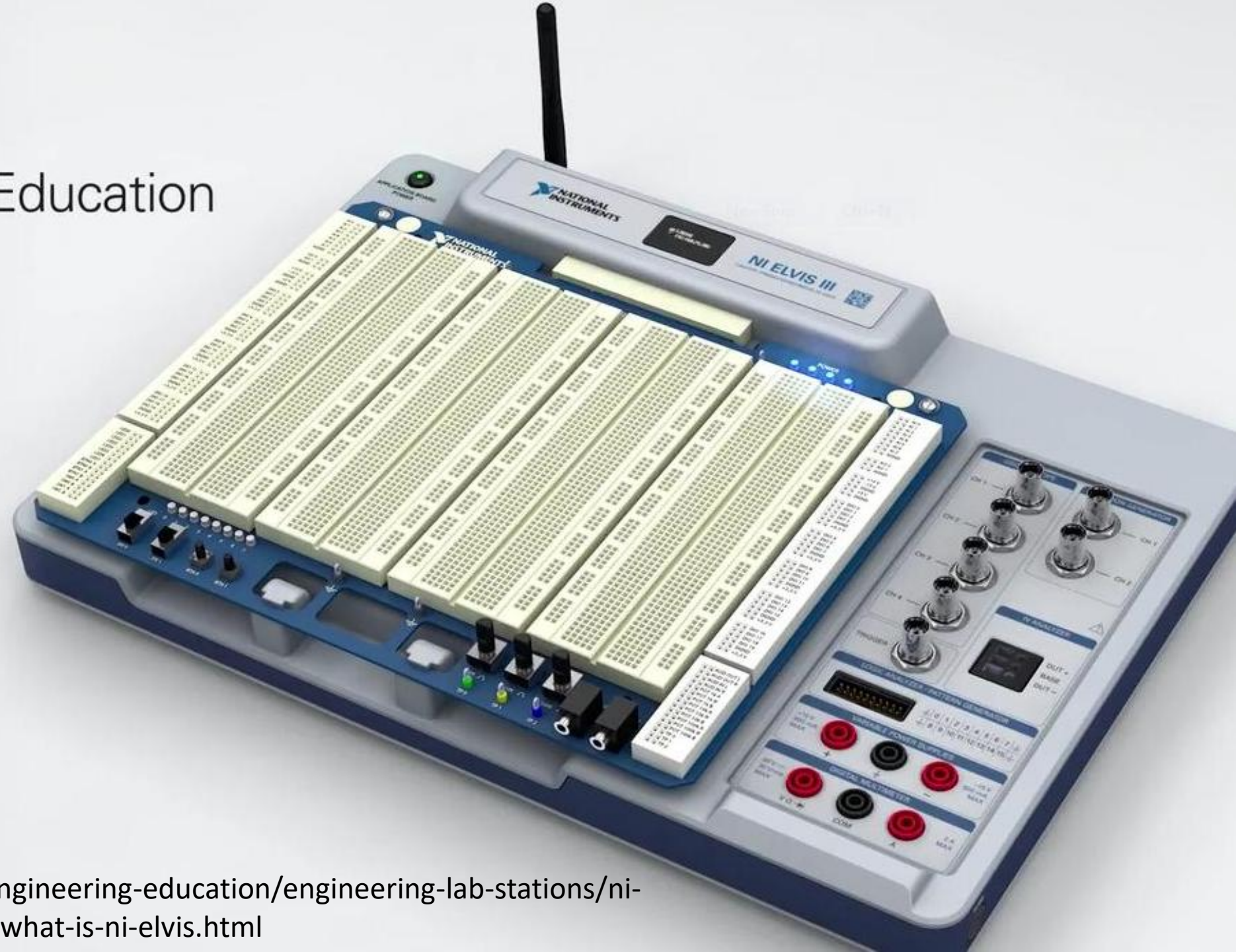
- ❖ Pe lângă faptul că, mediul LabVIEW oferă posibilitatea dezvoltării unor aplicații virtuale grafice orientate mai mult înspre sistemele de monitorizare, supraveghere, control și achiziție de date de la senzori (eng. SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition), același mediu, oferă posibilitatea integrării echipamentelor și aparaturilor atât de laborator, cât și industriale, precum:
 - ✓ Plăci de achiziție montate în calculator (ex. PCI-6221)
 - ✓ Echipamente și platforme de lucru externe (ex. NI – Elvis II)
 - ✓ Platforme de dezvoltare microprogramabile cu FPGA (ex. myRIO-1900)

Placă de achiziție multifuncțională National Instruments PCI-6221



NI ELVIS III

For Engineering Education



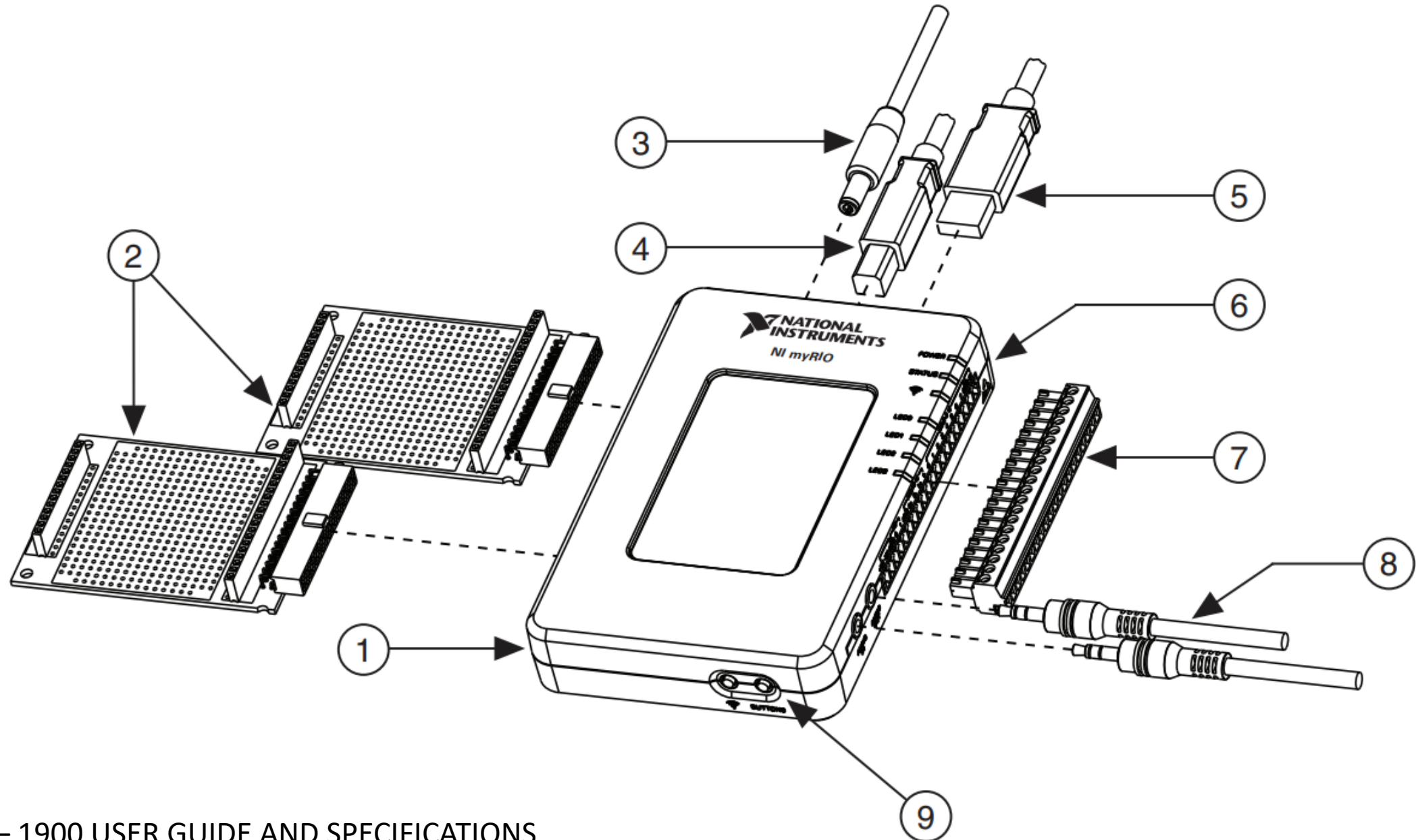
<https://www.ni.com/ro-ro/shop/engineering-education/engineering-lab-stations/ni-elvis-engineering-lab-workstation/what-is-ni-elvis.html>

Platforma de dezvoltare National Instruments MyRIO 1900



<https://www.ni.com/ro-ro/support/model.pci-6221.html>

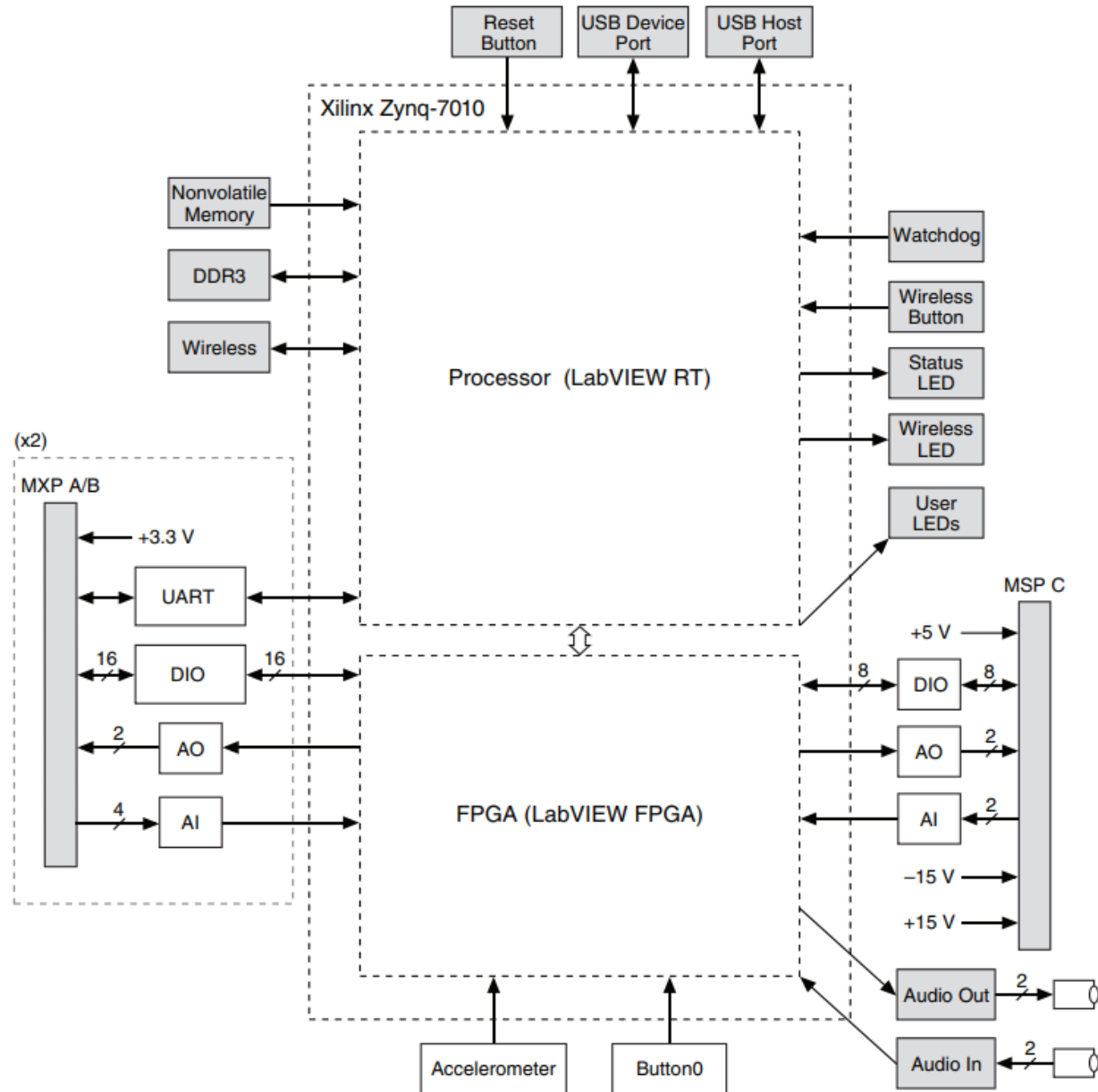
Componentele platformei de dezvoltare NI MyRIO 1900



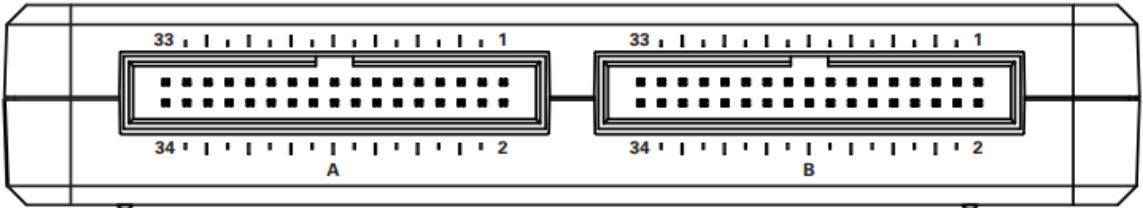
Componentele platformei de dezvoltare NI MyRIO 1900

1. NI MyRIO-1900
2. Plăcuță pentru conectare echipamentelor externe (eng. **MyRIO eXpansion Port** - MXP)
3. Cablu pentru alimentare
4. Conector USB – B pentru conectarea platformei de dezvoltare la calculator
5. Conector USB – A pentru conectarea echipamentelor la platforma de dezvoltare
6. Indicatori luminoși de stare (LED)
7. Conector pentru terminale cu șurubel (eng. **Mini System Port** – MSP – Screw Terminal)
8. Conectori pentru echipamentele audio
9. Buton cu funcție programabilă

Arhitectura internă a platformei de dezvoltare NI MyRIO 1900

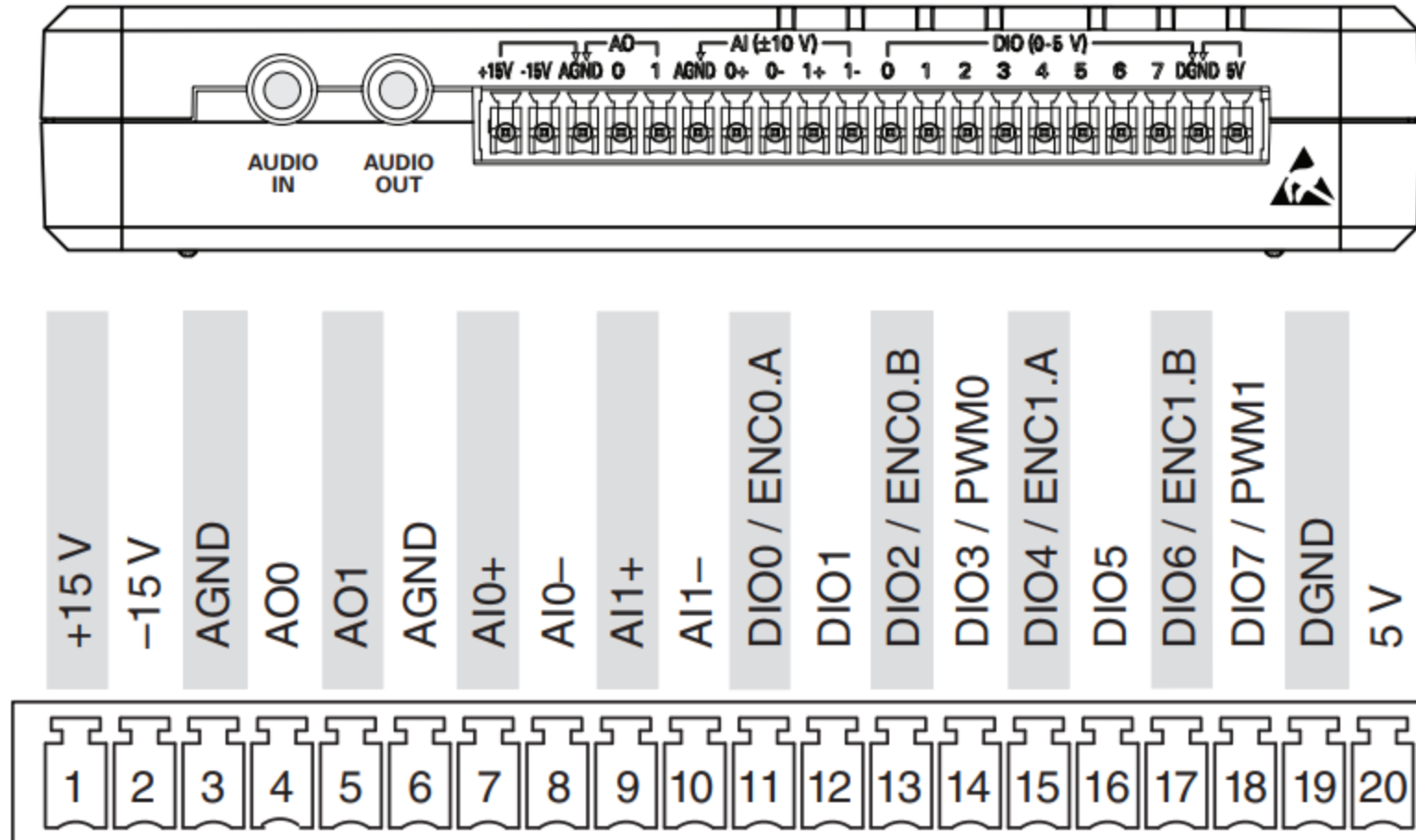


Harta terminalelor din blocurile de conectori MXP



DIO15 / I2C.SDA	33	34	+3.3 V
DIO14 / I2C.SCL	31	32	DIO10 / PWM2
DGND	29	30	DIO9 / PWM1
DGND	27	28	DIO8 / PWM0
DIO13	25	26	DIO7 / SPI.MOSI
DGND	23	24	DIO6 / SPI.MISO
DIO12 / ENC.B	21	22	DIO5 / SPI.CLK
DGND	19	20	DIO4
DIO11 / ENC.A	17	18	DIO3
DGND	15	16	DIO2
UART.TX	13	14	DIO1
DGND	11	12	DIO0
UART.RX	9	10	AI3
DGND	7	8	AI2
AGND	5	6	AI1
AO1	3	4	AI0
AO0	1	2	+5V

Harta terminalelor din blocul de conectori MSP

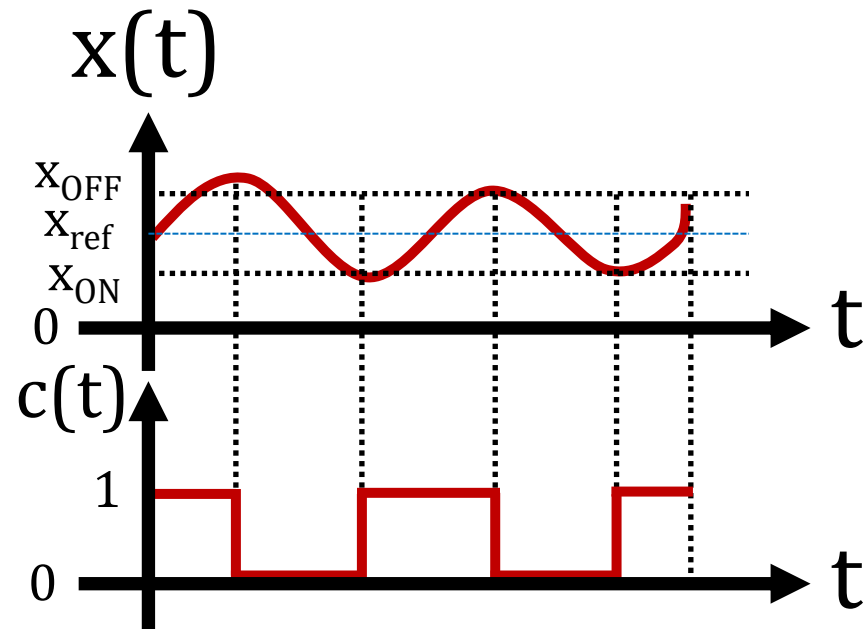


Implementarea strategiilor de comandă și control cu ajutorul sistemelor de calcul specializare

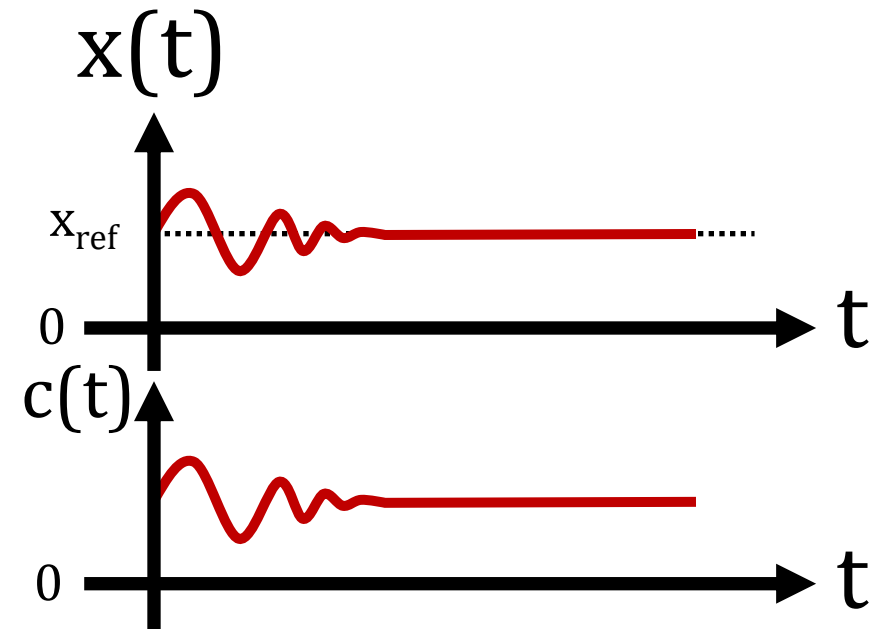
- ❖ Pentru a implementa strategiile de comandă și control la nivelul aparaturii (fizice) de laborator vor fi implicate următoarele resurse:
- ✓ Platforma de dezvoltare cu FPGA NI MyRIO 1900
- ✓ Mediul de re-configurare NI LabVIEW FPGA
- ✓ Mediul de modelare, simulare și testare MathWorks Matlab - Simulink
- ✓ Mediul de testare automată în timp real NI VeriStand

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

- ❖ În domeniul Inginerie Electrice există două categorii de strategii de control:
- ✓ **Controlul mărimilor pe baza fenomenului de „histerezis”**
- ✓ Controlul mărimilor pe bază de regulator „proporțional – integrator”



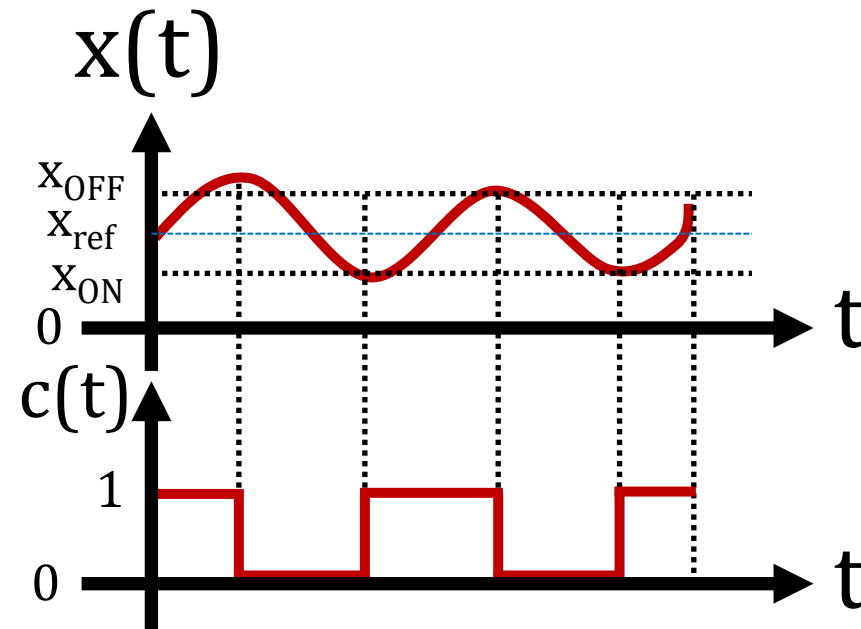
Histerezis



Regulator „P. I.”

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

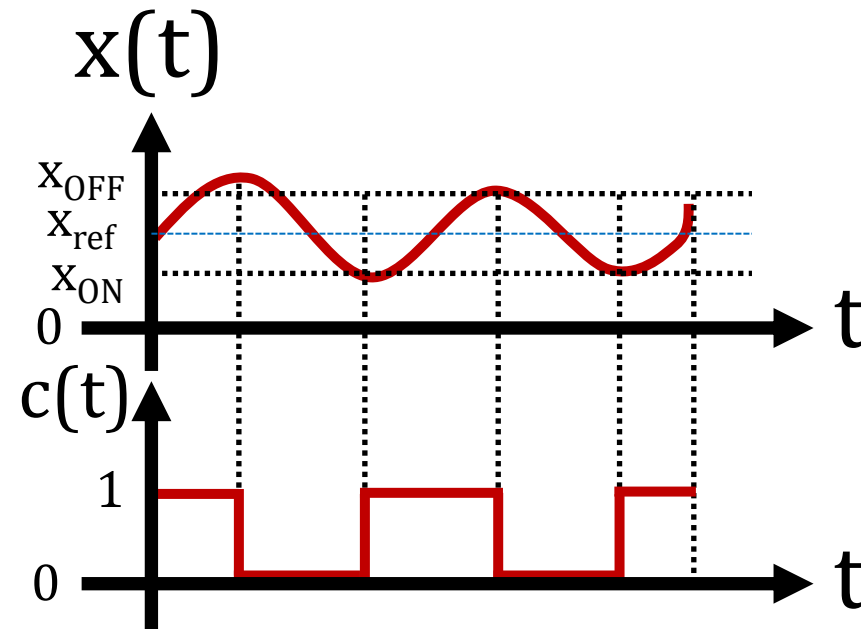
- ❖ Controlul mărimilor pe baza fenomenului de „histerezis”:
- ✓ Necesită achiziționarea unui semnal analogic generat de o mărime fizică
- ✓ Semnalul de comandă al elementului de execuție este digital



Histerezis

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

- ❖ Controlul mărimilor pe baza fenomenului de „histerezis”:
- ✓ Se bazează pe efectul de inerție (este potrivit pentru fenomene fizice lente)
- ✓ Nu necesită un algoritm complex de implementare



Histerezis

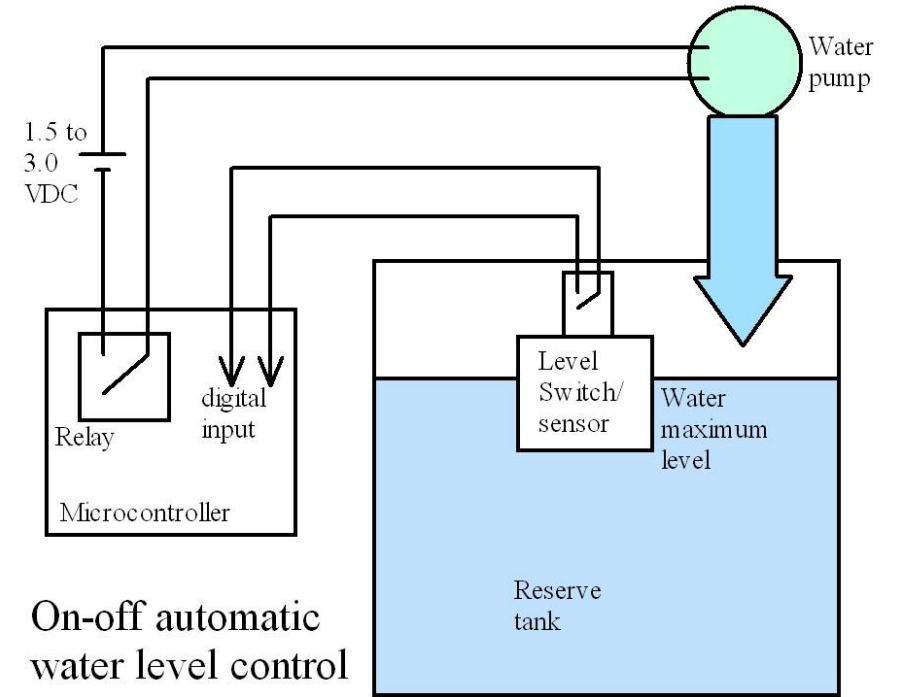
Mijloace fizice necesare în vederea implementării strategiilor de control

- ❖ În vederea implementării strategiei de control cu histerezis, este necesară utilizarea atât intrărilor analogice pentru a prelua semnalele de la traductoare, cât și utilizarea ieșirilor digitale pentru acționarea elementelor comutatoare din cadrul elementelor de execuție. Există două categorii de elemente comutatoare:
 - ✓ Relee electromecanice
 - ✓ Tranzistoare sau relee pe bază de tranzistoare

Exemple de aplicații ale controlului pe bază de „histerezis”

- ❖ Există o serie de aplicații practice ale strategiei de control pe baza fenomenului de „histerezis”:
 - ✓ Reglarea temperaturii într-o încălț
 - ✓ Comutarea iluminatului pe baza condițiilor ambiante
 - ✓ Reglarea nivelului de lichid într-un bazin
 - ✓ Implementarea protecțiilor de curenț sau tensiune într-un circuit
 - ✓ Reglarea cuplului la mașinile electrice
 - ✓ Reglarea procesului de încărcare a bateriei
 - ✓ Reglarea fluxului energetic într-un sistem bidirecțional

Aplicații practice ale semnalelor analogice – elemente de execuție



<https://altex.ro/proiector-led-cu-senzor-de-miscare-myria-my2240-10w-400-lumeni-negru/cpd/CILMY2240/>

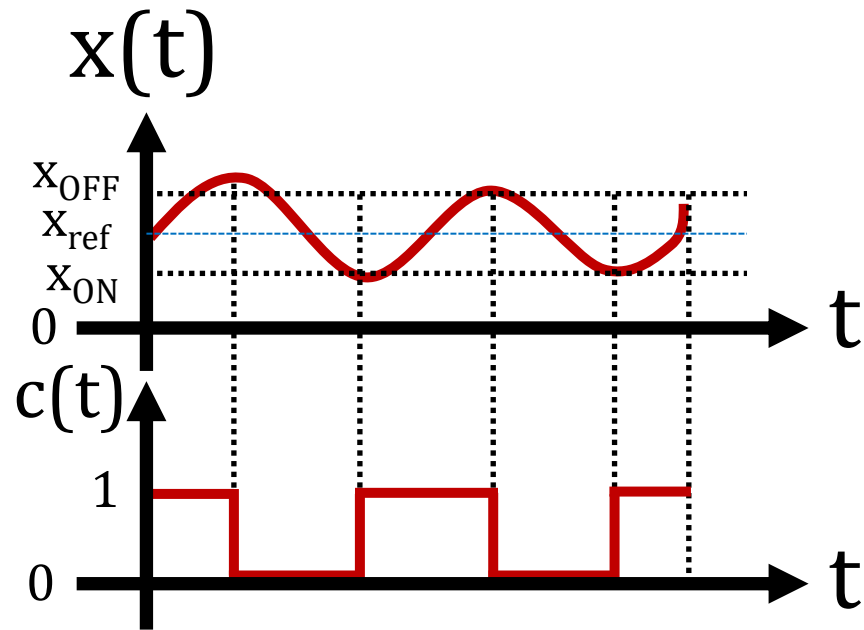
<https://www.puntofotante.net/ON-OFF-CONTROL-OF-WATER-LEVEL-WITH-MICROCONTROLLER-18F2550.htm>

<https://www.amazon.de/-/en/CT60-Thermostat-Central-Heating-Hysteresis/dp/B098K7G983>

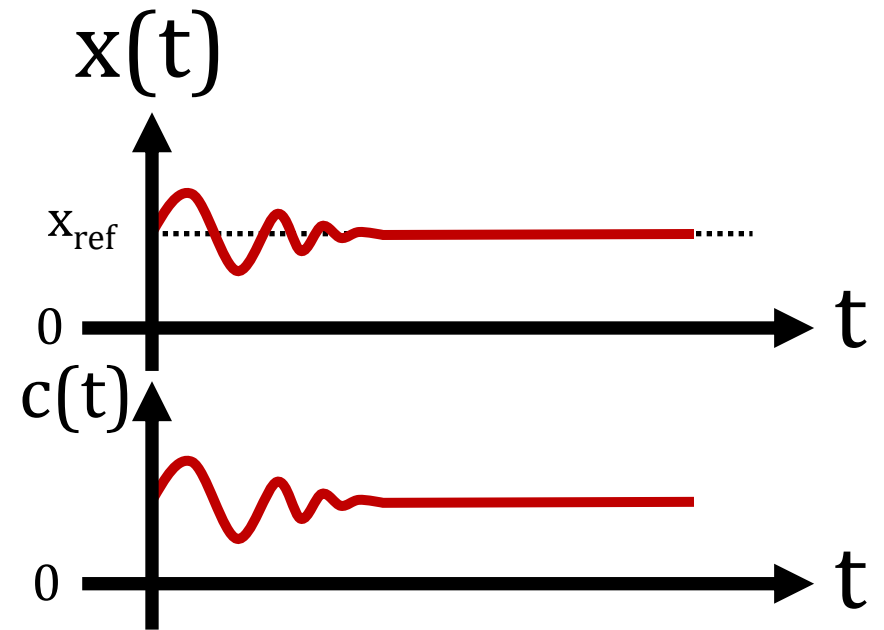
<https://royal.ps/smart-energy/products/electric-heaters/quartz-electric-heater111> https://en.wikipedia.org/wiki/Float_switch

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

- ❖ În domeniul Inginerie Electrice există două categorii de strategii de control:
- ✓ Controlul mărimilor pe baza fenomenului de „histerezis”
- ✓ **Controlul mărimilor pe bază de regulator „proporțional – integrator”**



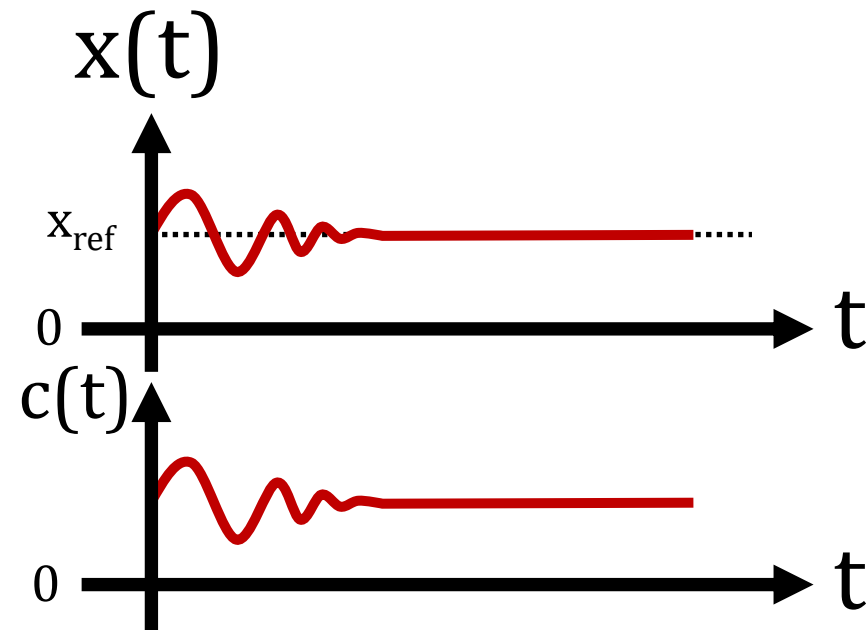
Histerezis



Regulator „P. I.”

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

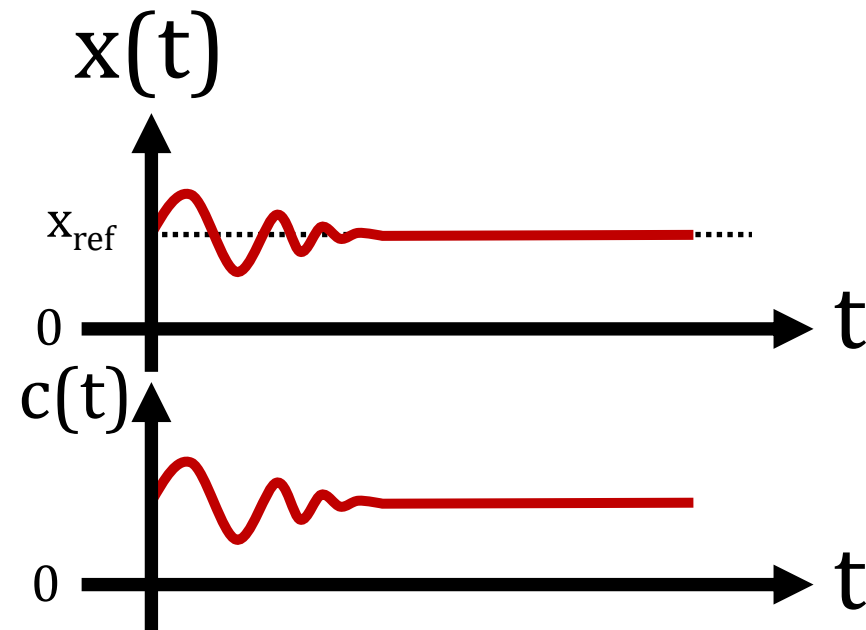
- ❖ Controlul mărimilor pe bază de regatoare PID:
- ✓ Necesită achiziționarea unui semnal analogic generat de o mărime fizică
- ✓ Semnalul de comandă rezultat al este de natură analogică



Regulator „P. I.D.”

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

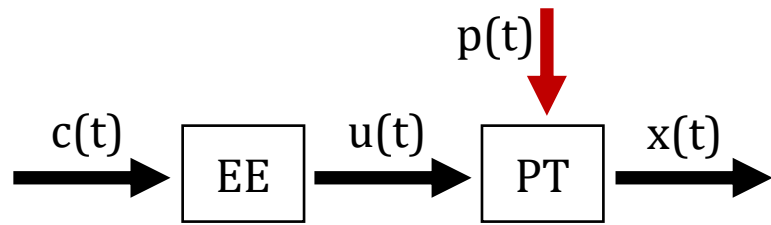
- ❖ Controlul mărimilor pe bază de regatoare PID:
- ✓ Necesită mai multe resurse de calcul decât în cazul reglării cu „histerezis”
- ✓ Se bazează pe aspectul dinamic al procesului tehnologic



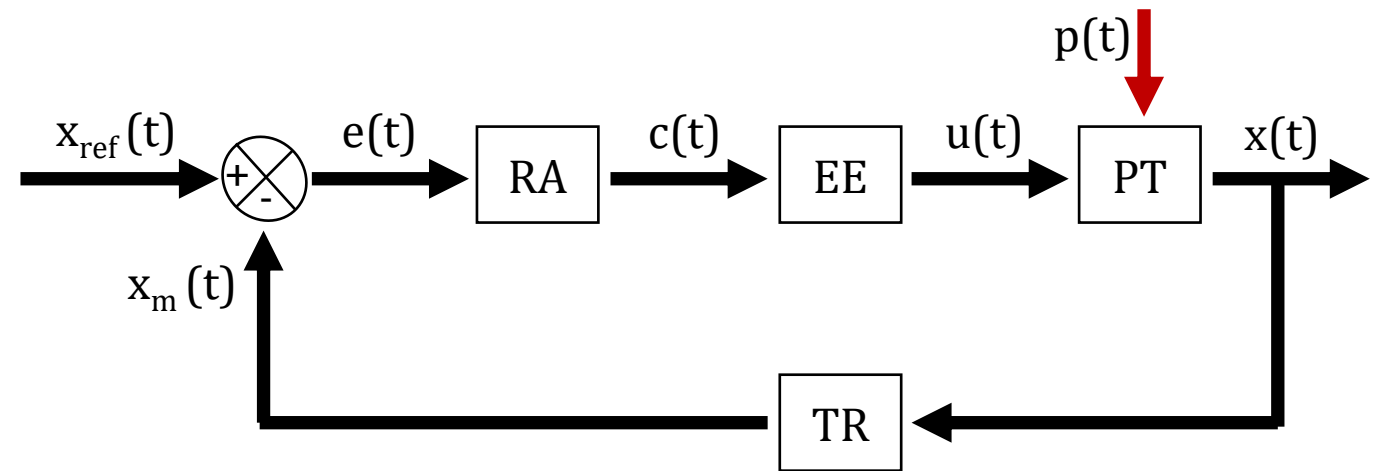
Regulator „P. I.D.”

Principalele strategii de control în domeniul Ingineriei Electrice

- ❖ Există două metode de reglare automată:
- ✓ Reglare în buclă deschisă pe baza unui semnal de comandă furnizat manual
- ✓ Reglare în buclă închisă pe baza unui semnal de comandă furnizat automat

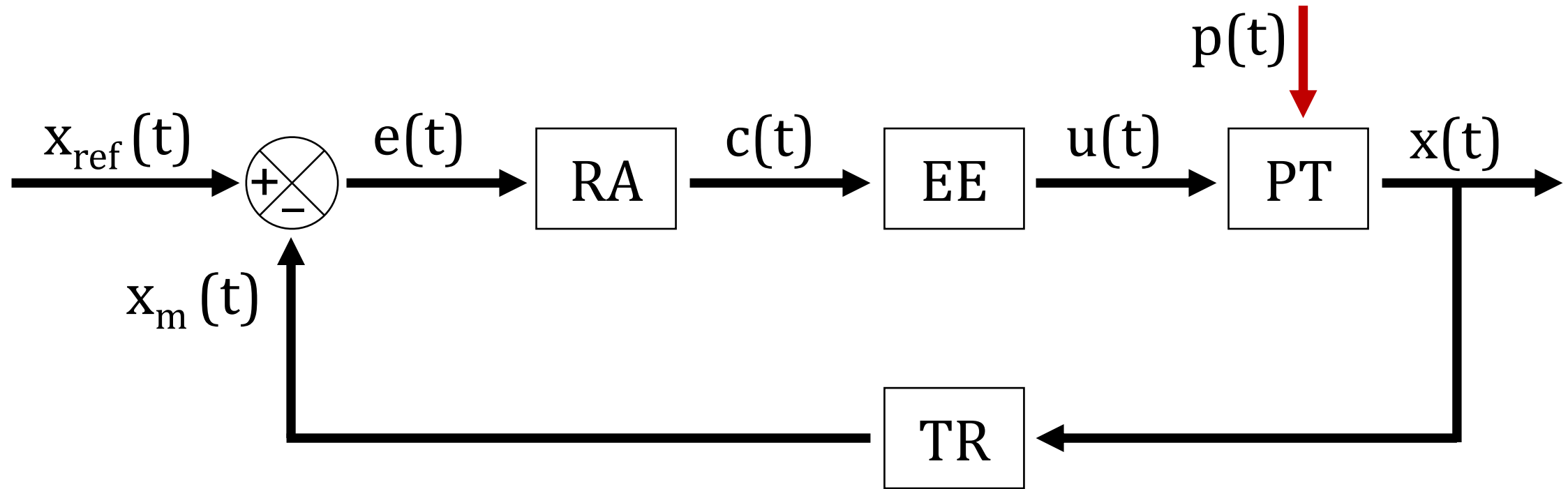


Reglare în buclă deschisă



Reglare în buclă închisă

Sisteme de reglare automată pe bază de regulator PID



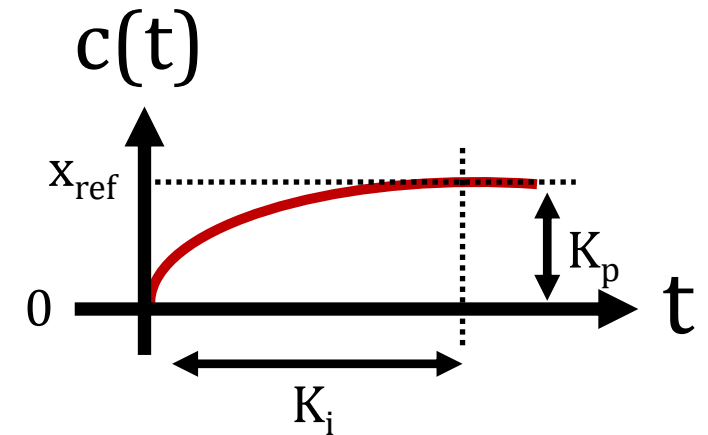
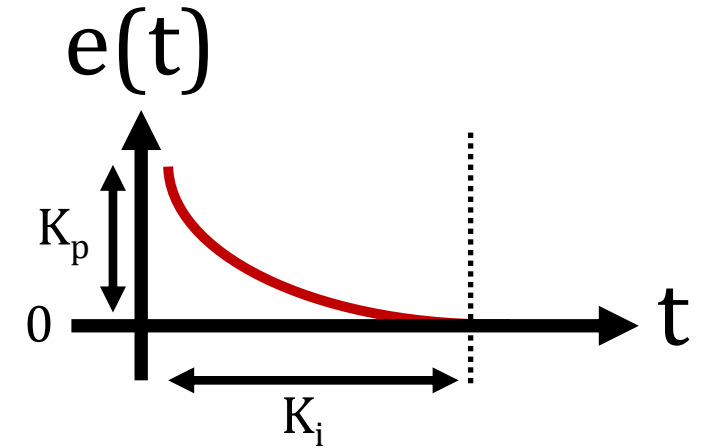
Sisteme de reglare automată pe bază de regulator PI

$$e(t) = x_{ref}(t) - x_m(t)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} [x_{ref}(t) - x_m(t)] = 0$$

$$c(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + \cancel{K_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t)}$$

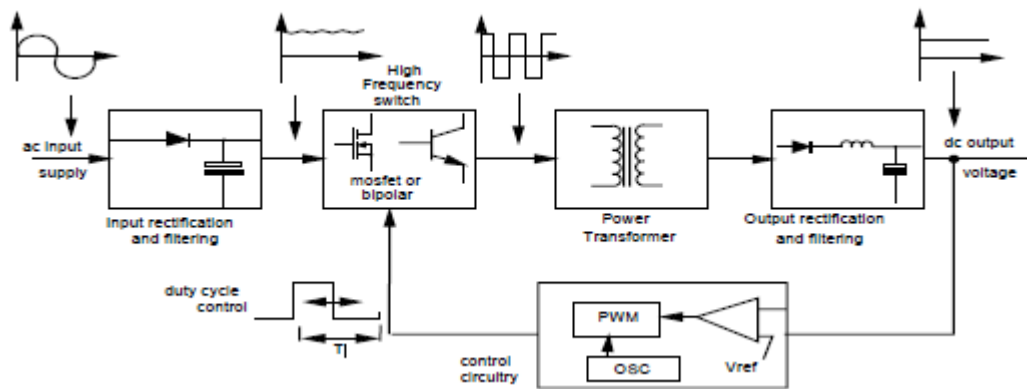
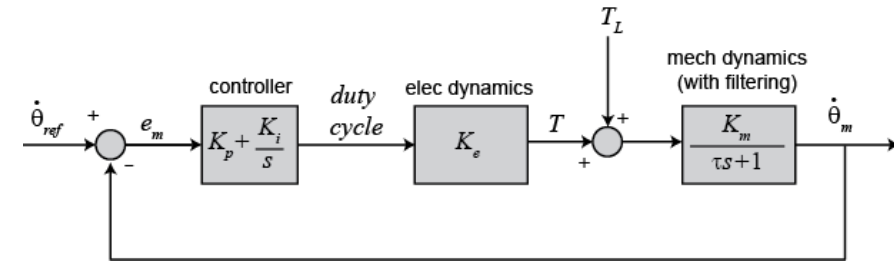
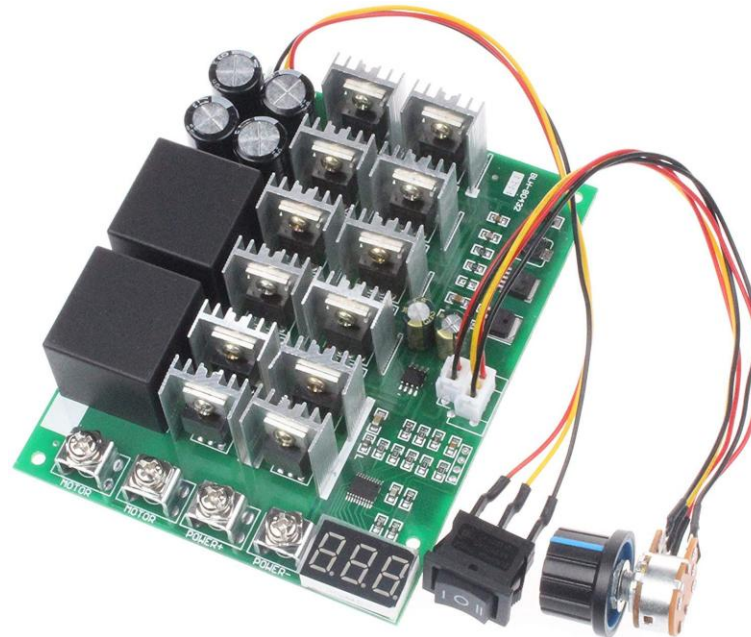
$$c(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$



Exemple de aplicații ale controlului pe bază de regulator PID

- ❖ Există o serie de aplicații practice ale strategiei de control pe bază de reglatoare PID:
 - ✓ Menținerea constantă a turației la arbore în cazul unei mașini electrice
 - ✓ Reglarea intensității luminoase
 - ✓ Reglarea debitului de lichid într-o instalație de distribuție
 - ✓ Stabilizarea tensiunii la ieșirea surselor de alimentare în comutație
 - ✓ Reglarea poziției în sisteme servo-acționate
 - ✓ Limitarea curentului într-un circuit

Exemple de aplicații implementate pe bază de regulator



https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_DCmotorB

<https://www.power-tronic.com/en/products/encoders/dc-magnetischer-inkrementalgeber/>

<https://www.sparkfun.com/products/retired/14099>

<https://www.electronics-tutorial.net/wp-content/uploads/2015/09/SMPS1.png>

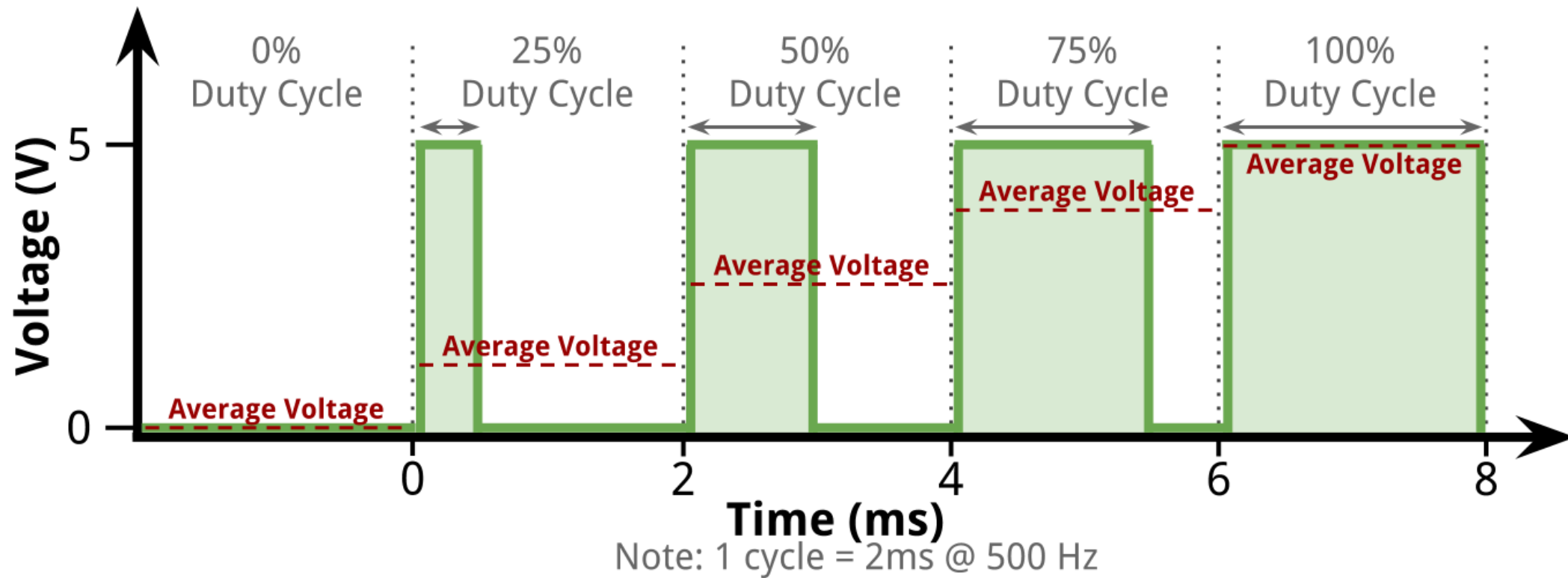
<https://www.amazon.com/ICQUANZX-Controller-10V-55V-Digital-Display/dp/B081YYK6NW>

Mijloace fizice necesare în vederea implementării reguletoarelor

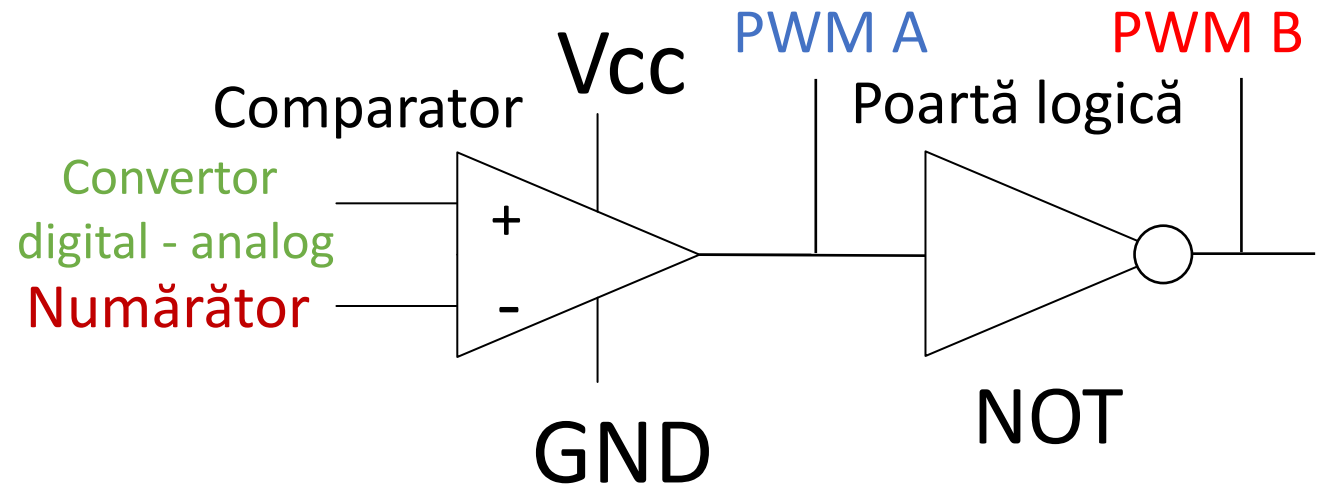
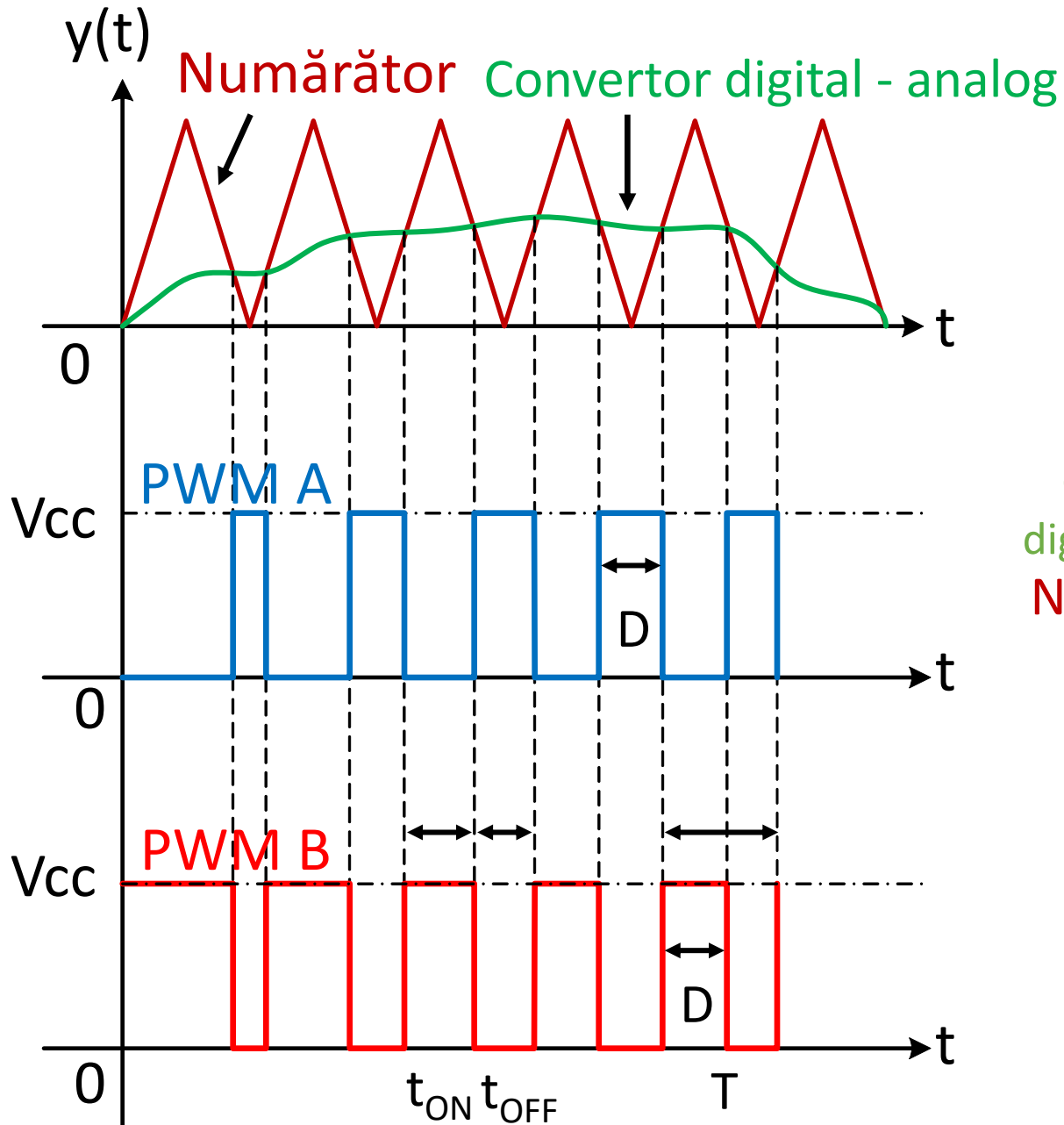
- ❖ În vederea implementării strategiei de control pe bază de regulator, este necesară utilizarea atât a intrărilor analogice pentru a prelua semnalele de la traductoare, cât și utilizarea ieșirilor analogice sau digitale pentru acționarea comutatoarelor din cadrul elementelor de execuție. Există multiple variante de implementare a etajelor de execuție:
 - ✓ Amplificatoare liniare de mare putere (surse controlate cu semnal analogic)
 - ✓ Convertoare electronice în regim de comutație (controlate digital)
 - ✓ Sarcini electronice programabile (controlate cu semnal analogic)
 - ✓ Servomecanisme și instalații de transmitere a mișcării acționate electric

Mijloace fizice necesare în vederea implementării reguletoarelor

Pulse Width Modulation Duty Cycles



Principiul generării semnalelor modulate în lăţime

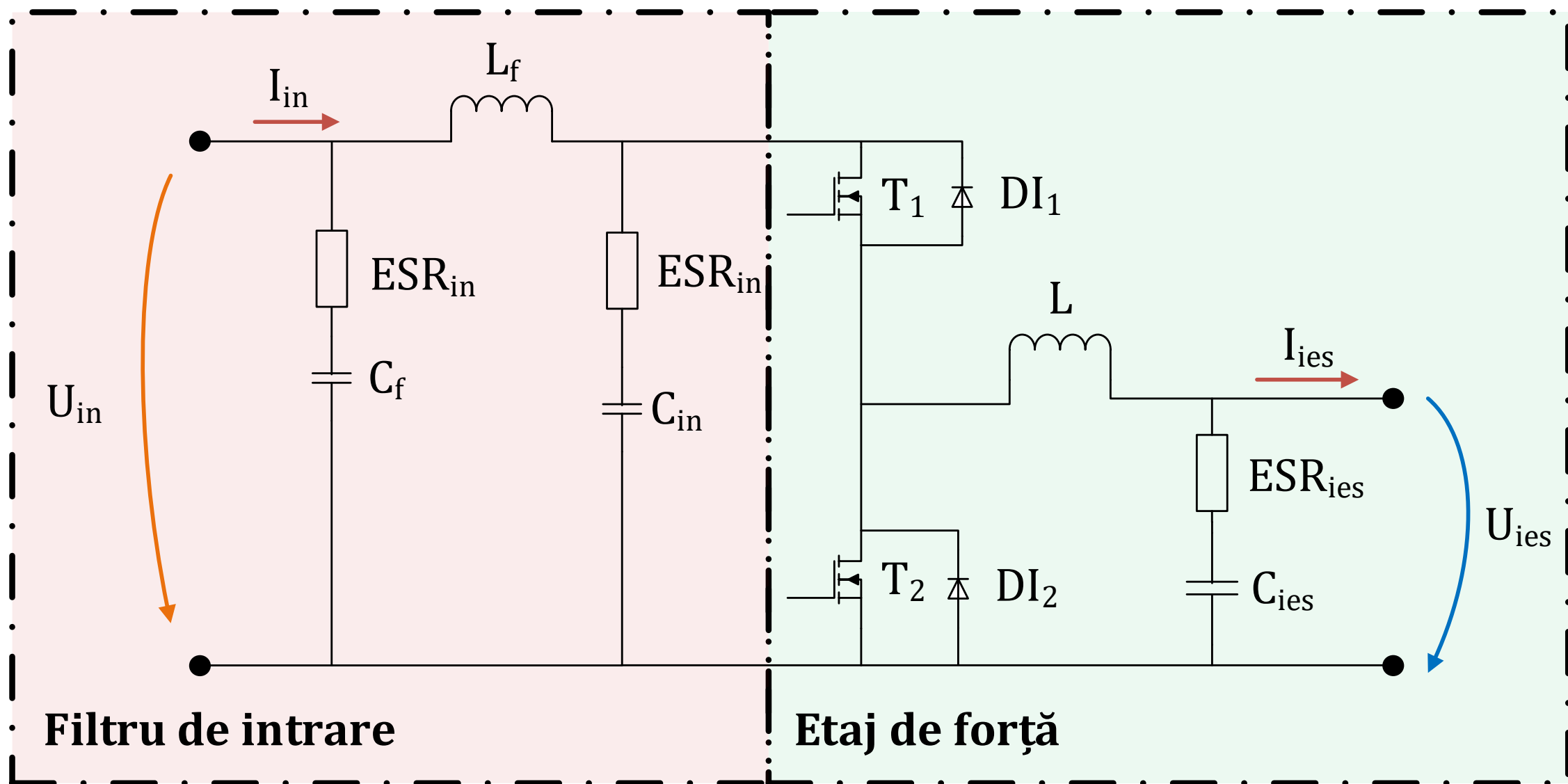


$$D = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \rightarrow T = \frac{1}{f_c}$$

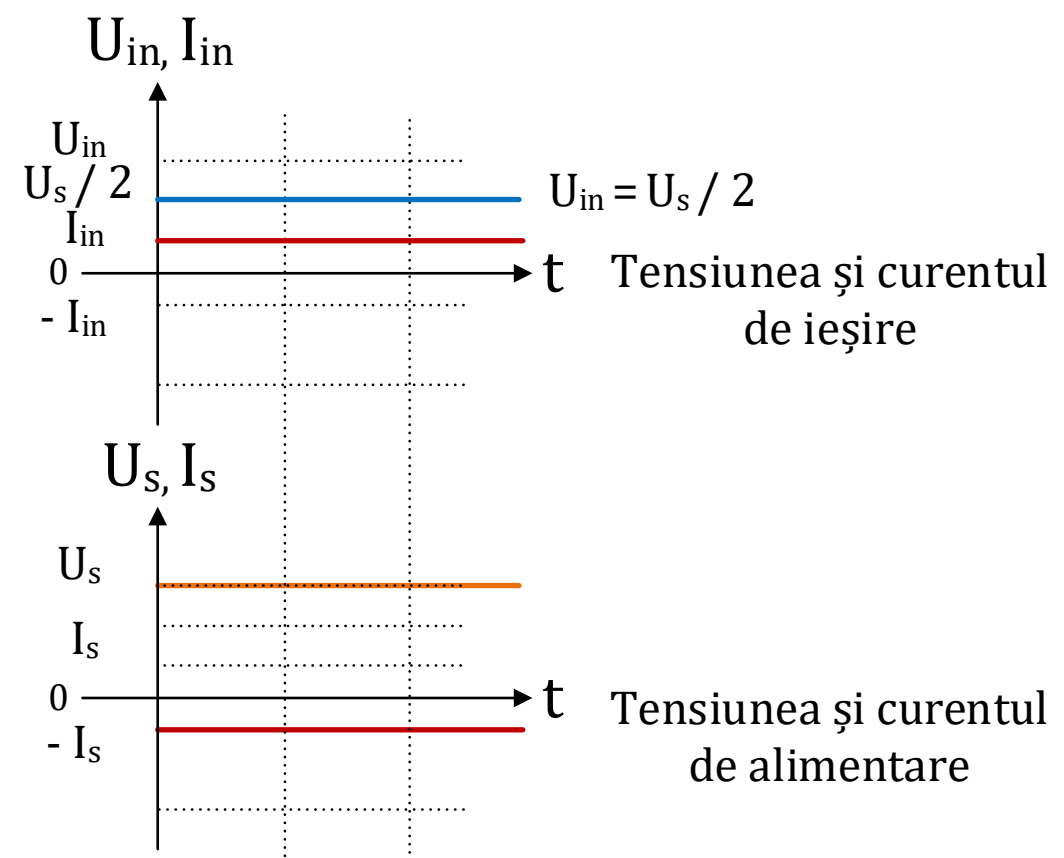
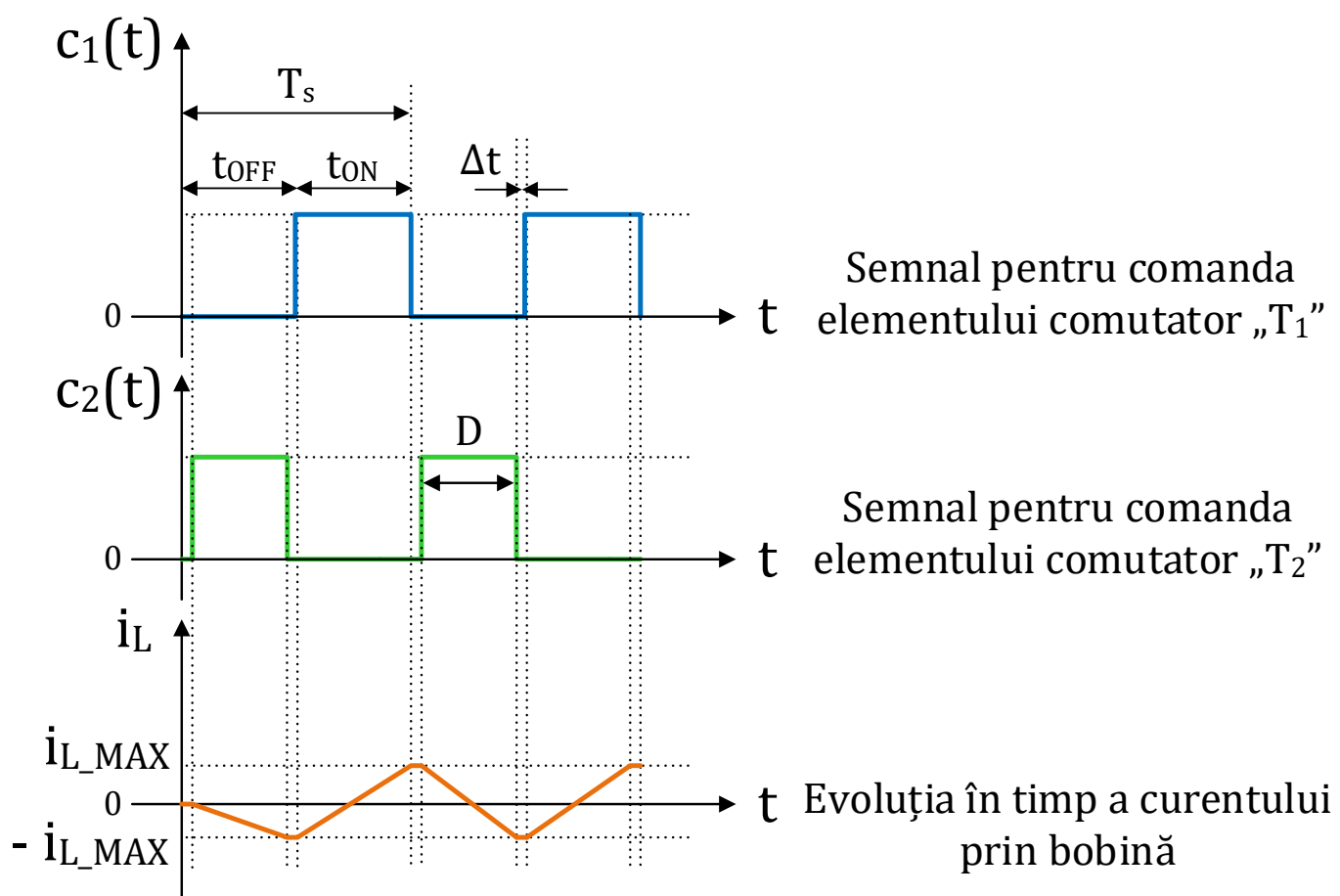
Mijloace logice necesare în vederea implementării strategiilor de control

- ❖ În vederea testării și implementării strategiilor de comandă și control se propune parcurgerea etapelor de modelare și simulare a unui convertor sincron coborâtor de tensiune. Se vor utiliza următoarele mijloace logice:
 - ✓ Mediul Matlab – Simulink
 - ✓ Paleta de instrumente SimScape Electrical
 - ✓ Modelele de reglatoare pre-implementate în Simulink

Topologia convertorului sincron de tensiune



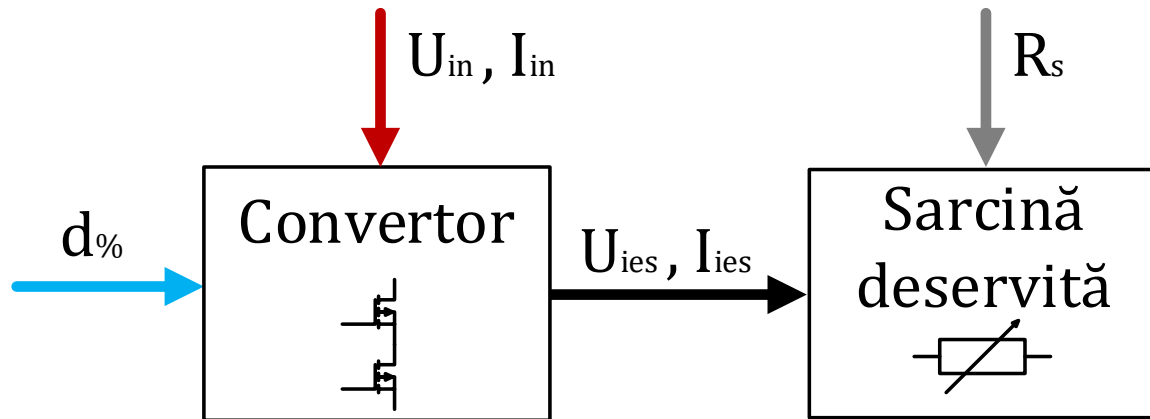
Semnalele de comandă pentru elementele comutatoare ale convertorului



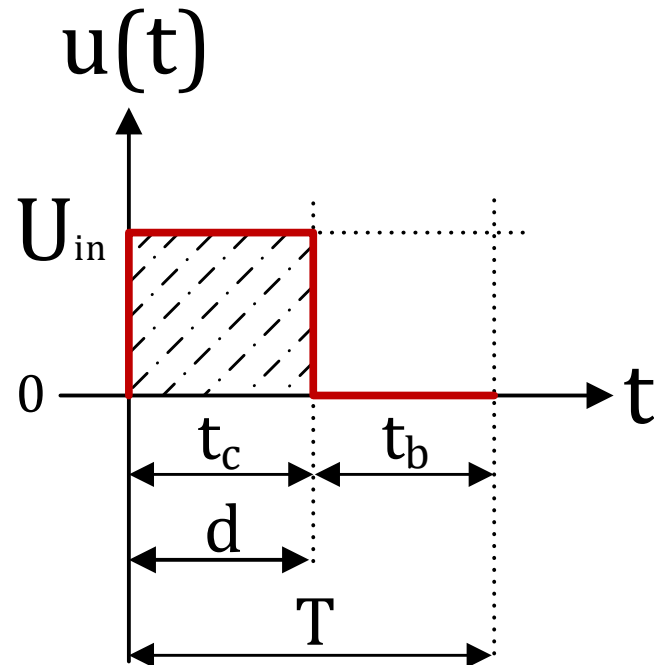
Tipuri de strategii de comandă și control

- ❖ În vederea testării și implementării strategiilor de comandă și control se propune implementarea strategiilor de comandă și control în următoarea ordine:
- ✓ Reglare în buclă deschisă
- ✓ Control în buclă închisă

Schema bloc a modului de funcționare al convertorului în buclă deschisă



$$U_{ies} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot dt = d \cdot \mathbf{U}_{in}$$

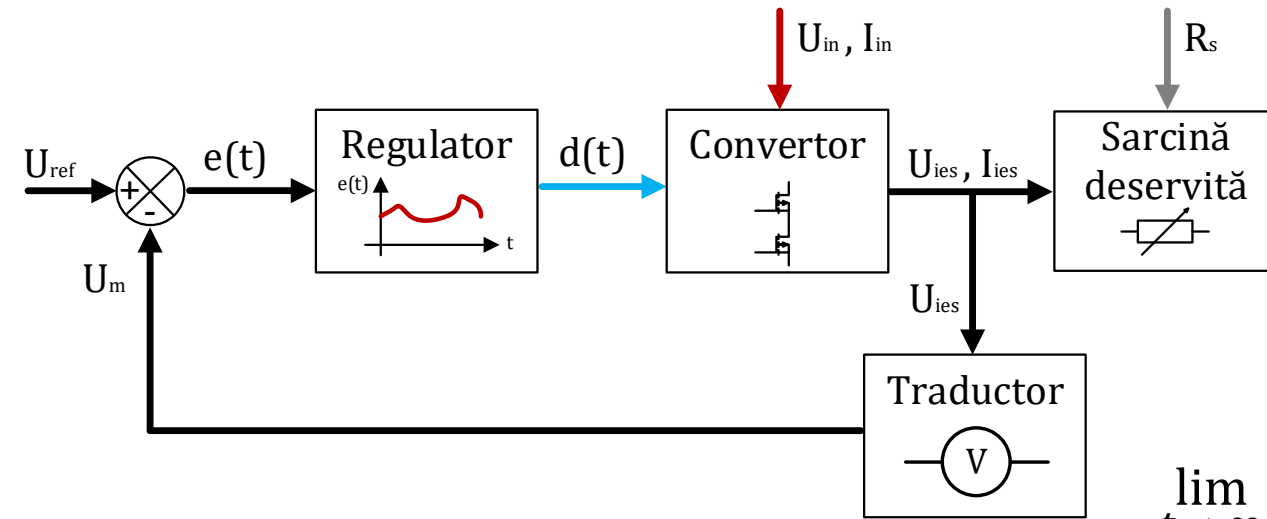


$$I_{ies} = \frac{U_{in} \cdot \mathbf{d}}{R_s} = \frac{U_{ies}}{\mathbf{R_s}}$$

Colectarea rezultatelor pentru simularea modelului în buclă deschisă

- ❖ În urma implementării modelului de simulare (în buclă deschisă) în cadrul mediului Matlab – Simulink + SimScape se vor colecta următoarele rezultate:
- ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de factorul de umplere
- ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de rezistența sarcinii deservite
- ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de tensiunea de intrare

Schema bloc a modului de funcționare al convertorului în buclă închisă



$$e(t) = U_{ref} - U_m \text{ unde } U_m \approx U_{ies}$$

$$U_{ies} = U_{in} \cdot d \rightarrow U_{ies} = R_s \cdot I_{ies}$$

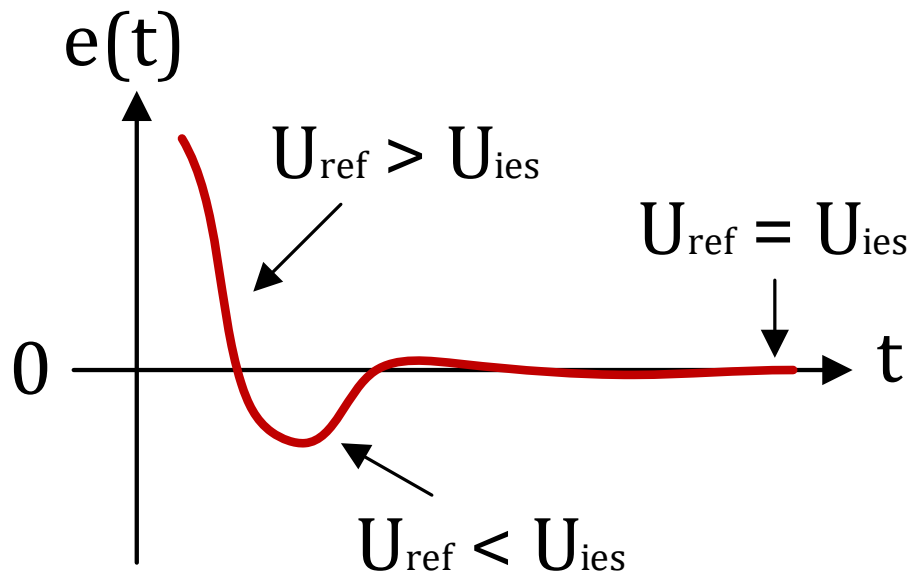
$$U_{in} \cdot d = R_s \cdot I_{ies}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \rightarrow e(t) = U_{ref} - U_{ies} = U_{ref} - [U_{in} \cdot d(t)]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \rightarrow e(t) = U_{ref} - [U_{in} \cdot d(t)] = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \rightarrow U_{ref} = [U_{in} \cdot d(t)] \rightarrow U_{ref} = U_{ies} = U_m$$

$$\frac{\partial d}{\partial t} = 0 \rightarrow d = const.$$



Stările sistemului de reglare automată în buclă închisă

- ❖ Există trei intervale în care eroarea sistemului „ $e(t)$ ” poate să ia valori:
 - ✓ $e(t) > 0$ sau eroarea este **pozitivă**, atunci când $U_{ref} > U_{ies}$ sau U_m
 - ✓ $e(t) = 0$ sau eroarea este **zero**, atunci când $U_{ref} = U_{ies} = U_m$
 - ✓ $e(t) < 0$ sau eroarea este **negativă**, atunci când $U_{ref} < U_{ies}$ sau U_m
- ❖ În acest sens, regulatorul va compensa factorul de umplere $d(t)$ astfel:
 - ❖ $e(t) > 0$ sau eroarea este **pozitivă**, atunci **$d(t) = ++$**
 - ❖ $e(t) = 0$ sau eroarea este **zero**, atunci **$d(t)_{fin.} = d(t)_{init.} = \text{const.}$** ($\partial d / \partial t = 0$)
 - ❖ $e(t) < 0$ sau eroarea este **negativă**, atunci **$d(t) = --$**

Expresia factorului de umplere într-un sistem de reglare automată pe bază de regulator proporțional - integrator

- ❖ Pentru stabilizarea tensiunii de ieșire va fi implementat modelul unui regulator proporțional – integrator având reglaj continuu (conform ecuației):

$$d(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot \partial t$$

- ❖ Având în vedere ecuația erorii sistemului, formula de exprimare a factorului de umplere poate fi scrisă astfel:

$$d(t) = K_p \cdot (U_{ref} - U_{ies}) + K_i \cdot \int_0^t (U_{ref} - U_{ies}) \cdot \partial t = K_p \cdot (U_{ref} - I_{ies} \cdot R_{ies}) + K_i \cdot \int_0^t (U_{ref} - I_{ies} \cdot R_{ies}) \cdot \partial t$$

- ❖ Pentru situația în care $e(t) = 0$ expresia factorului de umplere se reduce la:

$$d(t) = K_i \cdot \int_0^t 0 \cdot \partial t = const.$$

Factorii perturbatori ai sistemului de reglare în buclă închisă

- ❖ Modificarea parametrilor precum rezistența de sarcină $\mathbf{R_s}$ sau tensiunea de alimentare $\mathbf{U_{in}}$ reprezintă un fenomen perturbator al bunei funcționări. Influența acestora asupra sistemului se poate regăsi în ecuațiile:

$$d(t) = K_p \cdot [U_{ref} - (\mathbf{R_s} \cdot I_{ies})] + K_i \cdot \int_0^t [U_{ref} - (\mathbf{R_s} \cdot I_{ies})] \cdot \partial t$$

$$d(t) = K_p \cdot [U_{ref} - (\mathbf{U_{in}} \cdot d)] + K_i \cdot \int_0^t [U_{ref} - (\mathbf{U_{in}} \cdot d)] \cdot \partial t$$

Colectarea rezultatelor pentru simularea modelului în buclă închisă

- ❖ În urma implementării modelului de simulare (în buclă închisă) în cadrul mediului Matlab – Simulink + SimScape se vor colecta următoarele rezultate:
 - ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de referința impusă
 - ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de rezistența sarcinii deservite
 - ✓ Variația tensiunii de ieșire în funcție de tensiunea de intrare

Definirea parametrilor de simulare

- ❖ În vederea implementării modelului de simulare se vor utiliza următorii parametri pentru componente și pentru mediul de simulare:
- ✓ timp total de simulare: $T = 3$ [s];
- ✓ timp de eșantionare (eng. Sample time): $T_s = 10^{-6}$ [s];
- ✓ tensiune de alimentare: $U_{in} = 350$ [V];
- ✓ frecvență de comutație: $f_c = 30$ [kHz];
- ✓ rezistența internă a sursei: $r = 0,5$ [Ω];
- ✓ capacitatea condensatorului din filtrul prezent la intrare: $C_f = 15,5$ [μ F];
- ✓ rezistența armăturilor condensatorului din filtru: $ESR_{in1} = 0,12$ [Ω];
- ✓ inductivitatea bobinei de filtrare: $L_f = 182$ [μ H];
- ✓ rezistența bobinei de filtrare: $r_{L_f} = 0,01$ [Ω];
- ✓ capacitatea condensatorului de intrare în convertor: $C_{in} = 300$ [μ F];
- ✓ rezistența armăturilor condensatorului de intrare: $ESR_{in2} = 0,12$ [Ω];
- ✓ tipul elementelor comutatoare: MOSFET WolfSpeed C3M0015065K;
- ✓ inductivitatea bobinei principale a convertorului: $L = 450$ [μ H];
- ✓ rezistența bobinei convertorului: $r_L = 0,01$ [Ω];
- ✓ capacitatea condensatorului de ieșire: $C_{ies} = 450$ [μ F];
- ✓ rezistența armăturilor condensatorului de ieșire: $ESR_{ies} = 0,03$ [Ω].