

AUTOMĀTISKĀS REGULĒŠANAS SHĒMAS ELEMENTU OPTIMIZĀCIJA OPTIMIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SCHEME ELEMENTS

A. Galiņš, P. Leščevics
LLU Lauksaimniecības Enerģētikas institūts
Institute of Agricultural Energetics, LUA

Abstract. The stability of adjusting device operation is essential in the activity of automatic regulation system. The comparator with a changeable zone of hysteresis action is very often used as the threshold element in the slowly variable regulation processes. Optimal values of elements' parameters of the comparator circuits can be found by using IBM program *Excel* in calculations. The article mathematically describes the operation of comparator within the measuring system and presents optimization of scheme elements and its activity applying *Excel* program. During the studies a universal version of calculations, as well as the application of comparator was created with a possibility to use different physical values in discreet two-position regulation systems.

Key words: automatic regulation, comparator, hysteresis of action, circuit optimization.

1. Ievads

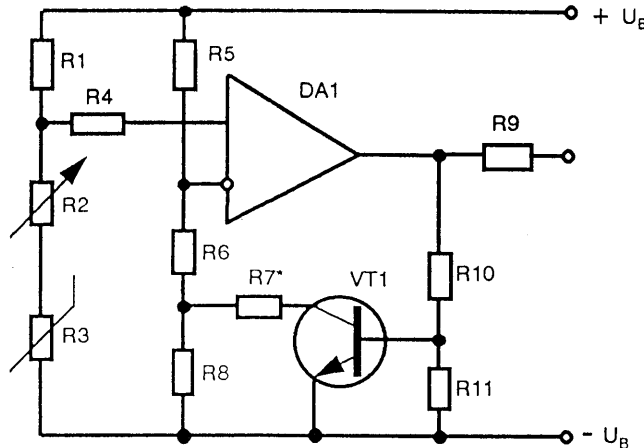
Būtisks faktors diskrēto automātisko regulēšanas sistēmu darbībā ir nostrādes stabilitāte. Tas sevišķi attiecas uz lēni mainīgiem procesiem, piemēram, temperatūras, mitruma un apgaismojuma regulēšanu, vielu dozēšanu u.c. Tādēļ šāda tipa regulatoros parasti tiek veidotas stabila nostrādes sliekšņa formēšanas shēmas. Vispiemērotākā šāda uzdevuma veikšanai ir komparatora shēma, kas salīdzina spriegumu uz mērīšanas pārveidotāja izejas ar atbalsta spriegumu. Kā parādīja pētījumi, ļoti augstā jutība, kuru nodrošina komparators, sistēmas darbā izsauc biežu pārslēgšanos ne tikai no mērāmā signāla izmaiņām, bet arī no traucējumiem barošanas ķēdēs. Lai to novērstu, var izmantot shēmas slēgumu ar pozitīvu atgriezenisko saiti, kas regulēšanas raksturīknei rada nepieciešamo histerēzi. Līdz ar to automātiskā sistēma sāk stabili strādāt divpozīciju regulēšanas režīmā.

2. Aprēķina metodika

Parasti mērīšanas pārveidotāju raksturīkne ir nelineāra, rezultātā regulatora gradācijas skala veidojas nelineāra. Bez tam, mainoties signāla izmaiņas ātrumam, neizbēgami mainās nostrādes histerēze. Tas nozīmē, ka katrā pārregulēšanas gadījumā ir jākorrigē nepieciešamās nostrādes robežas. Lai to ievērtētu, tika izstrādāta metodika komparatora shēmas elementu optimizācijai. Pētījumiem izmantots temperatūras regulators, kura shēma redzama 1. attēlā. Šajā shēmā tradicionālā pozitīvā atgriezeniskā saite papildināta ar tranzistoru VT1, kas strādā slēdža režīmā un ļauj mainīt komparatora nostrādes histerēzi plašās robežās. Eksperimentālie pētījumi parādīja, ka šāds shēmas risinājums būtiski uzlabo regulatora darbību.

Viens no darbietilpīgākajiem shēmas izveides procesiem ir ieejas sprieguma dalītāja elementu optimizācija, atkarībā no izmantojamā mērīšanas pārveidotāja parametriem. Ja shēma tiek izstrādāta vienam konkrētam mērīšanas pārveidotājam, tad shēmas elementus var aprēķināt vai arī piemeklēt praktiski. Mūsu mērķis bija izveidot 1. attēlā parādītās shēmas ieejas dalītāja aprēķina un

optimizācijas paņēmienus. Shēmas pamatsastāvdaļa ir operacionālais pastiprinātājs DA1, kurš saslēgts komparatora slēgumā. Spriegumu U_{IE1ies} uz tiešās ieejas nosaka dalītājs R1; R2; R3. Šajā shēmas posmā rezistors R2, ar maināmu pretestību, kalpo nostrādes sliekšņa iestatīšanai, bet R3 ir mērīšanas pārveidotājs (termistors). Rezistora R4 uzdevums ir ierobežot strāvu operacionālā pastiprinātāja tiešajā ieejā. Uz operacionālā pastiprinātāja invertējošās ieejas atbalsta spriegumu U_{IE2} nodrošina ar R5, R6, R7, R8, R_{KE} un R_{IE} . R5, R6, R8 ir pastāvīga nomināla rezistori, bet rezistors R7 jāpiemeklē, jo tas ietekmē nostrādes histerēzi. R_{KE} - tranzistora VT1 emitera-kolektora pārejas pretestība, kas atkarīga no tranzistora stāvokļa. Lielumu R_{IE} , kas ir operacionālā pastiprinātāja DA1 ieejas pretestība, var neņemt vērā, jo $R_{IE} \gg R5, R6, R8$.



1. att. Temperatūras regulatora principiālā shēma.
Fig. 1. Principal scheme of temperature regulator.

Atbalsta spriegumu U_{IEinv} var aprēķināt, izmantojot sakarību

$$U_{IE} = \left(\frac{U_B}{\left(\frac{R8(R7 + R_{KE})}{R8 + R7 + R_{KE}} + R6 \right) + R5} \right) \left(\frac{R8(R7 + R_{KE})}{R8 + R7 + R_{KE}} + R6 \right), \quad (1)$$

kur: U_B - shēmas barošanas spriegums.

Vienkāršoti varam apzīmēt

$$\frac{R8(R7 + R_{KE})}{R8 + R7 + R_{KE}} + R6 = R_X, \quad (2)$$

bet, tādā gadījumā varam rakstīt, ka

$$U_{IE} = \frac{U_B R_X}{R_X + R5} = \frac{U_B}{1 + \frac{R5}{R_X}}. \quad (3)$$

Praktiski ir iespējami divi atbalsta sprieguma U_{IEinv} līmeņi, - U_{IE1} un U_{IE2} . Šos līmeņus nosaka tranzistora VT1 emitera - kolektora pārejas pretestība atvērtā un aizvērtā stāvoklī. Starpība starp U_{IE1} un U_{IE2} praktiski atbilst komparatora nostrādes histerēzei ΔU_{inv} , kas savukārt nosaka temperatūras regulēšanas histerēzi $\Delta t = t_{iesl} - t_{izsl}$. Komparatora tiešajai ieejai spriegumu U_{IE1ies} pievada no sprieguma dalītāja R1, R2, R3 un to var aprēķināt pēc sakarības:

$$U_{I_{E_{ies}}} = \left(\frac{U_B}{R1 + R2 + R3} \right) (R2 + R3) = \frac{U_B}{1 + \frac{R1}{R2 + R3}}, \quad (4)$$

kur R2 - potenciometra pretestība;

R3 - mērīšanas pārveidotāja pretestība.

Komparatora nostrāde notiek brīdī, kad $U_{I_{E_{ies}}} > U_{I_{Env}}$, tas ir, kad spriegums uz dalītāja R1, R2, R3 izejas kļūst lielāks par atbalsta spriegumu uz invertējošās ieejas. Komparatora nostrādes brīdī uz tā izejas formējas piesātinājuma spriegums, kurš caur rezistoru R10 tiek padots uz tranzistora VT1 bāzi. Tranzistors atveras līdz dziļam piesātinājumam, līdz ar to kolektora-emitera pārejas pretestība R_{KE} samazinās un kļūst daudzkārt mazāka par R8. Tā kā $R_{KE} + R7$ pieslēgta paralēli rezistoram R8, tad kopējā pretestība šajā posmā samazinās un, līdz ar to, uz komparatora invertējošās ieejas samazinās spriegums no U_{IE1} uz U_{IE2} . Bez tam, komparatora izejas spriegums vienlaicīgi ieslēdz sildīšanas ciklu. Termorezistora pretestība atbilstoši temperatūras pieaugumam samazināsies, kas savukārt samazinās spriegumu uz komparatora tiešās ieejas līdz sprieguma vērtībai U_{IE2} . Brīdī, kad $U_{I_{E_{ies}}}$ kļūst mazāks par U_{IE2} , operacionālais pastiprinātājs pārslēdzas un uz tā izejas spriegums samazinās līdz minimālai robežai, bet tas izraisa tranzistora VT1 aizvēršanos, kā arī regulēšanas sistēmas sildīšanas cikla pārtraukšanu. Līdz ar to shēma atgriežas sākuma stāvoklī, jo operacionālā pastiprinātāja tiešajā ieejā spriegums $U_{I_{E_{ies1}}}$ ir zemāks par spriegumu $U_{I_{Env}}$. Shēmas optimizācijas aprēķinos pieņēmām, ka, īsi pirms pārslēgšanās, spriegums uz komparatora ieejām ir vienāds $U_{I_{Env}} = U_{I_{E_{ies}}}$. Šāds pieņēmums ļauj vienādot sakarības (3), (4):

$$\frac{U_B}{1 + \frac{R5}{R_X}} = \frac{U_B}{1 + \frac{R1}{R2 + R3}}, \quad (5)$$

no kurienes

$$R1 R_X = R5 (R2 + R3), \quad (6)$$

bet izvērsta formā

$$R1 \left(\frac{R8(R7 + R_{KE})}{R8 + R7 + R_{KE}} + R6 \right) = R5 (R2 + R3). \quad (7)$$

No sakarības (7) varam atrast R2+R3:

$$R2 + R3 = \frac{R1}{R5} \left(\frac{R8(R7 + R_{KE})}{R8 + R7 + R_{KE}} + R6 \right). \quad (8)$$

3. Analīze un optimizācija

Vienādojumu (8) izmanto, veidojot elektronisko tabulu. Elektriskajai shēmai (skat. 1. att.) ar potenciometru R2 mainot regulējamo temperatūru, mainās arī ieslēgšanās, izslēgšanās histerēze. Aprēķina piemēram izvēlamies termistoru MMT-4 (3.3 kΩ), temperatūras intervālā no 25 °C līdz 85 °C. No pareizas shēmas elementu izvēles ir atkarīgs darbības režīms visā regulējamo temperatūru diapazonā. Tāpēc, veidojot optimālo elektroniskās shēmas risinājumu, var rasties nepieciešamība koriģēt rezistoru R1, R5, R6, R7, R8 pretestības. Elektroniskā tabula ir izveidota pēc sistēmas, kura ļauj ērti eksperimentēt ar shēmas darbības režīmiem uz datora ekrāna, pamatojoties uz iepriekš izveidoto shēmas matemātisko aprakstu. Tabulas konfigurācija (skat. 1. tab.) atļauj ērti koriģēt jebkuru no ieejas parametriem un momentāni novērtēt rezultātu.

1. tabula / Table 1

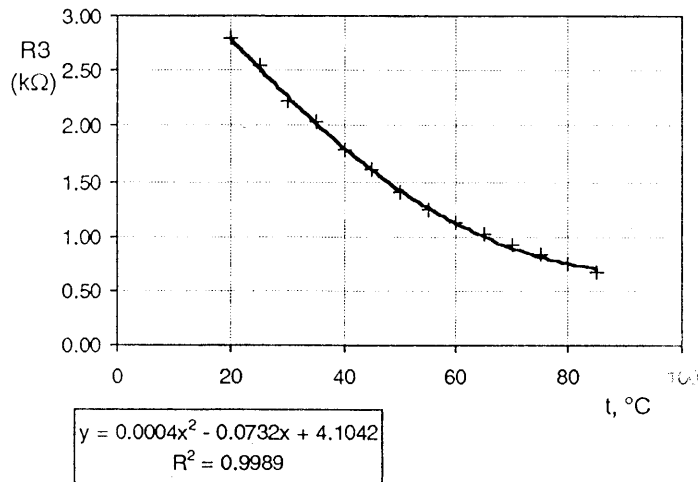
Automātiskās vadības shēmas optimizācijas aprēķini
Optimisations calculation of automatic control scheme

Nr.p.k.	t_{iesl}	t_{izsl}	Δt	R1	R2	R3	R7	Izsl. off U_{iesl1}	Izsl. on U_{iesl2}	Izsl. off R2+R3	Izsl. on R2+R3	$R3_{iesl}$	R_{X2}
1	23	25	1.6	7.5	4.92	2.52	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	2.63	8.25
2	27	30	3.43	7.5	5.18	2.27	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	2.37	8.25
3	31	35	4.28	7.5	5.41	2.03	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	2.13	8.25
4	36	40	4.44	7.5	5.63	1.82	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.92	8.25
5	41	45	4.18	7.5	5.82	1.62	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.72	8.25
6	46	50	3.76	7.5	6.00	1.44	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.55	8.25
7	52	55	3.41	7.5	6.16	1.29	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.39	8.25
8	57	60	3.32	7.5	6.29	1.15	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.25	8.25
9	61	65	3.66	7.5	6.41	1.04	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.14	8.25
10	65	70	4.6	7.5	6.50	0.94	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	1.04	8.25
11	69	75	6.24	7.5	6.58	0.86	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	0.97	8.25
12	71	80	8.68	7.5	6.64	0.81	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	0.91	8.25
13	73	85	12	7.5	6.67	0.77	4.30	5.978	6.02	7.44	7.55	0.87	8.25

R 1 = 7.5 K Ω R 5 = 8.2 K Ω R 8 = 0.75 K Ω R_{KE1} = 0.01 K Ω
R 4 = 3.0 K Ω R 6 = 7.5 K Ω U_B = 12 V R_{KE2} = 1000 K Ω

Koriģējamie ieejas dati ir izvietoti attiecīgajās ailēs R1, R4, R5, R6, R7, R8, U_B , R_{KE1} , R_{KE2} . Mainīgie aprēķinu lielumi ir t_{iesl} , t_{izsl} , Δt , R2, R3, U_{IE1} , U_{IE2} , R2+R3, $R3_{iesl}$, R_{X1} , R_{X2} . Komparatora izslēgšanās temperatūra t_{izsl} ņemta robežās no 25 °C līdz 85 °C ar soli 5 °C. Termorezistora R3 raksturliktne $R3=f(t)$ (skat. 2.att.) iegūta eksperimentāli un aprēķināta kā otrās kārtas regresijas vienādojums:

$$R3=0.0004 \cdot t_{izsl}^2 - 0.0732 \cdot t_{izsl} + 4.1042. \quad (9)$$



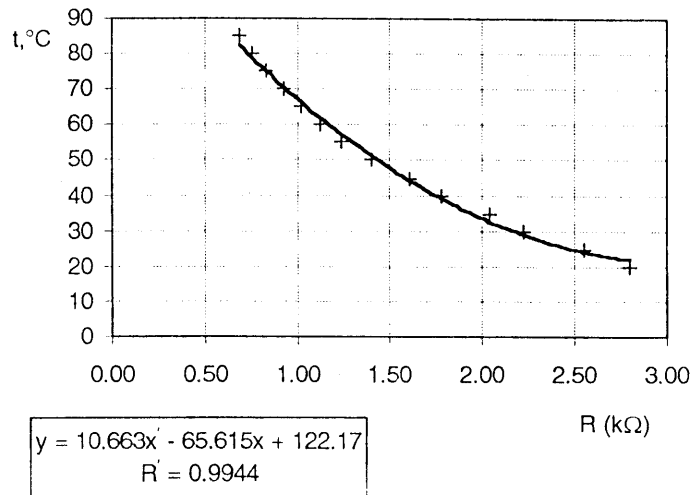
2. att. Termorezistora MMT-4 (3.3 k Ω) raksturliktne.

Fig. 2. Curve of the thermistor MMT-4 (3.3 k Ω).

Elektroniskās tabulas sākuma daļā, izmantojot sakarību (2), aprēķina sprieguma dalītāja pretestības komponenti R_X , kas nosaka komparatora atbalsta spriegumu pie divām tranzistora ieejas pretestības (R_{KE1} un R_{KE2}) vērtībām, atbilstoši ieslēgšanas un izslēgšanas režīmam.

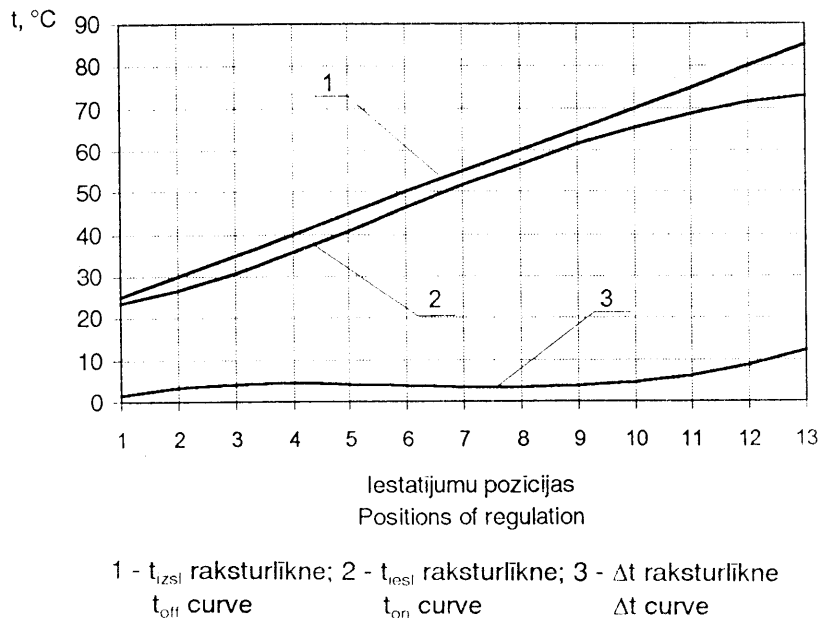
Turpinājumā ar sakarības (3) palīdzību nosaka operacionālā pastiprinātāja invertējošās ieejas pārslēgšanās spriegumus U_{IE1} un U_{IE2} . Bet ar sakarību (8) tiek aprēķināta tilta pleca $R2+R3$ kopējā pretestība komparatora ieslēgšanai un izslēgšanai. No pretestību summas $(R2+R3)_{izsl}$, atņemot termistora ($R3$) zemākās un augstākās pretestības vērtību var noteikt $R2$ robežlielumus, kuri nepieciešami pareizai potenciometra $R2$ izvēlei. Bet no summas $(R2+R3)_{iesl}$ atņemot $R2$, tiek noteikta termistora pretestība $R3_{iesl}$ komparatora ieslēgšanās brīdī. Lai varētu noteikt ierīces ieslēgšanās temperatūru t_{iesl} , nepieciešama termistora inversā raksturlikne $t=f(R3)$, kuru iegūstam grafikas formā un kura redzama 3. attēlā. Regulatora ieslēgšanās temperatūra aprēķināta ar sakarības (10) palīdzību:

$$t_{iesl} = 10.663(R3_{iesl})^2 - 65.615(R3_{iesl}) + 122.17. \quad (10)$$



3. att. Termorezistora MMT-4 inversā raksturlikne.
Fig. 3. Inverse curve of the thermistor MMT-4.

Nosakot temperatūru t_{izsl} un t_{iesl} , var aprēķināt pārslēgšanās temperatūru histerēzi Δt . Temperatūru t_{izsl} , t_{iesl} un histerēzes Δt raksturliknes ir redzamas 4. attēlā. Šeit taisne 1 parāda izslēgšanās



4. att. Komparatora raksturlikne un ieslēgšanās-izslēgšanās histerēze.
Fig. 4. Curve of comparator and on/off switching hysteresis.

temperatūras t_{zsl} izmaiņu pie dažādiem potenciometra R2 iestatījumiem ik pa 5°C . Līkne 2 parāda atbilstošās regulatora ieslēgšanās temperatūras. Līkne 3 ir temperatūras regulēšanas histerēze Δt atbilstoši potenciometra R2 pozīcijām. No raksturliķnes 3 redzams, ka ieslēgšanās histerēze ir nelineāri mainīga visā temperatūras regulēšanas diapazonā. Piemēram, vismazākā histerēze ir pie $t_{zsl} = 25^{\circ}\text{C}$, kur $\Delta t = 1.6^{\circ}$, pie $t_{zsl} = 40^{\circ}\text{C}$ $\Delta t = 4.44^{\circ}$, bet pie $t_{zsl} = 60^{\circ}\text{C}$ $\Delta t = 3.32^{\circ}$. Šāda raksturliķne dod pilnīgu priekšstatu par regulēšanas histerēzes izmaiņām, kuras rodas mērīšanas pārveidotāja un mērīšanas shēmas, respektīvi, komparatora savstarpējās mijiedarbības rezultātā. Izmantojot šo elektroniskajā tabulā iegūto raksturliķni, varam piemeklēt R7 vērtības, pie kurām histerēze Δt paliktu nemainīga, pie kam, katras izmaiņas ietekmi darba gaitā var novērot vizuāli. Bez tam, šī programma dod iespēju novērtēt arī komparatora ieejas spriegumu U_{IE1} , U_{IE2} histerēzi.

4. Slēdziens

1. Izveidota metodika komparatora shēmas optimizācijai, ar kuras palīdzību var paplašināt automātiskās regulēšanas ierīces pielietojšanas iespējas, saglabājot galvenos regulēšanas kvalitātes parametrus.
2. Šis komparatora shēmas optimizācijas piemērs ir izmantojams shēmu konstruēšanai, pielietojot dažādus mērīšanas pārveidotājus.
3. Elektronisko tabulu izmantošana rada iespēju izpētīt shēmas elementu parametrus, tos aprakstot matemātiski un pēc tam modelējot projektēšanas stadijā. Šādā veidā var iegūt dažādus shēmas variantus un izvēlēties optimālākos risinājumus, mainot mērīšanas pārveidotāju vai regulēšanas nejutības zonu.

Literatūra

1. Greivulis. J., Raņķis I. (1992). Modernās elektronikas pamati. Rīga: Avots. 164.
2. Niedrīte L. (1995). MICROSOFT EXCEL 5.0 lietpratējiem. Rīga: ComputerLand/Rīga. 176.
3. Хвоц С.Т., Варлинский Н.Н., Попов Е.А. (1987). Микропроцессоры и микроэвм в системах автоматического управления. Ленинград. 640.
4. Шилейко А. В., Шилейко Т.И. (1986). Микропроцессоры. Москва. Радио и связь. 112.