

ASINHRONĀ ĢENERATORA AR GĀZDĪZEĻA PIEDZIŅU AUTOMĀTISKĀS VADĪBAS SISTĒMAS ANALĪZE ANALYSIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH GAS DIESEL DRIVE

A. Šniders, A. Galiņš

LLU Lauksaimniecības enerģētikas institūts
Institute of Agricultural energetics, LLU

Abstract. The paper reports on the design of a structural block diagram of an automatic control system of an asynchronous generator with gas diesel drive. An automatic current control of the AC generator is executed by a feedback $P-I$ pulse regulator with a permanent velocity gas valve driving actuator. The tuning stability of the automatic control system and parameters of $R-C$ feedback circuit are optimised and simulated. Criteria for parameter installing are obtained.

Key words: gas diesel, asynchronous generator, automatic control, system analysis, transfer function, optimization, system stability.

1. Ievads

Lai nodrošinātu asinhronā ģeneratora (AG) ar gāzdīzeļa (GD) piedziņu slodzes strāvas / stabilizāciju, nepieciešams sintezēt automātiskās stabilizācijas sistēmu (ASS), kas kompensētu perturbāciju (gāzes spiediena, elektriskā tīkla sprieguma un elektriskās slodzes izmaiņas) iespaidu uz regulējamā parametra / stabilitāti. Tā kā sistēmā izmantots proporcionāli integrālais ($P-I$) impulsregulators, kura pārejas procesa raksturlielumi var linearizēt mazas amplitūdas pašsvārstību diapazonā (A. Kļujevs, 1989), tad ASS analīzei un optimizācijai izmantota lineāro stacionāro sistēmu teorija, kas bazējas uz Laplasa transformāciju un operatorrēķiniem (H. Kvakernaks, R. Sivans, 1977).

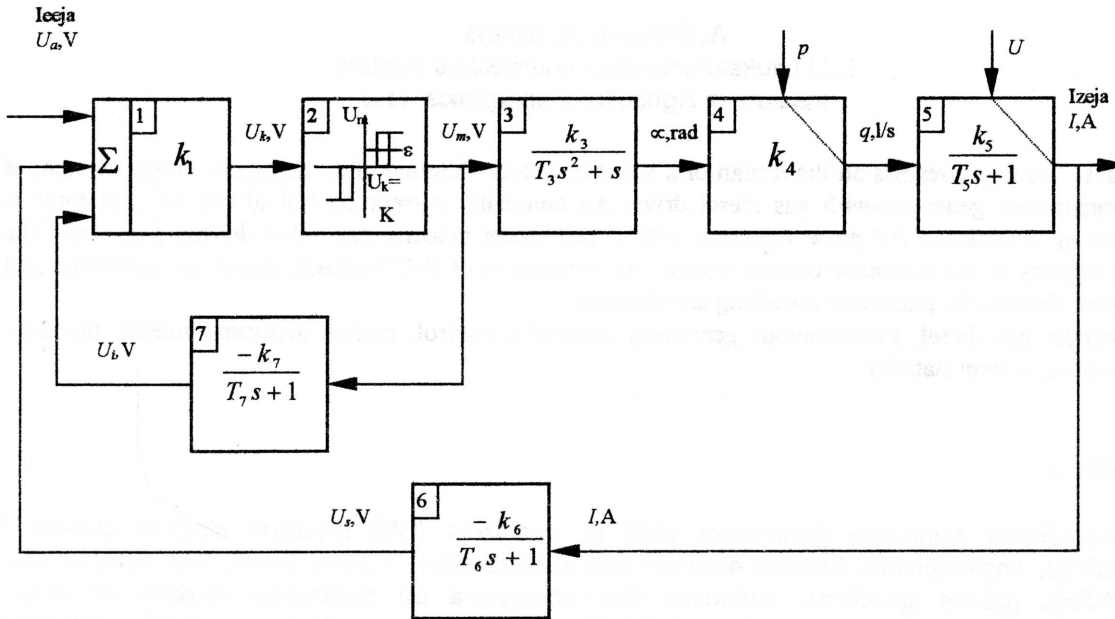
Pētāmā ASS pieskaitāma ātrdarbīgu, mazinerciālu sistēmu grupai, tādēļ tās pārejas procesa kvalitātes galvenais kritērijs ir minimāls regulēšanas laiks ar aperiodisku pārejas procesu un vienu pārregulējumu. ASS pārejas procesa modelēšana ar datoru dod iespēju analizēt lielu variantu skaitu, mainot sistēmas funkcionālo posmu parametrus, un optimizēt pārejas procesu (A. Bašarins, J. Postņikovs, 1990; J. Topčejevs, 1989).

2. Pētījumu objekts un metodes

Pētījumu objekts ir slodzes strāvas automātiskās stabilizācijas sistēma (ASS) asinhronam ģeneratoram ar gāzdīzeļa piedziņu. Tās stabilitātes un darbības kvalitātes analīze veikta ar operatormetodi, lietojot Laplasa transformāciju. Šajā nolūkā sastādīta slodzes strāvas ASS algoritmiskā struktūrshēma asinhronam ģeneratoram ar gāzdīzeļa piedziņu (1. att.). Tajā parādīti ASS funkcionālo posmu statistiskie un dinamiskie pastiprinājuma koeficienti. Struktūrshēma sastāv no diviem bezinerces posmiem - komparatora (1) un gāzes ventiļa (4), kuru jutību raksturo pārvades koeficienti k_1 un k_4 , inerciāla integrējoša posma - elektriska izpildmehānisma (3) ar elektromehānisko laika konstanti T_3 un ātruma koeficientu k_3 , trim aperiodiskiem posmiem (5, 6, 7) un nelineāra posma - trīspozīciju releja (2). Uz izpildierīci - gāzes ventili (4) darbojas

perturbācija p (gāzes spiediena svārstības), kas iespaido vadības objekta - gāzdīzeļa ģeneratora (5) darbību. Tā izejas parametru slodzes strāvu I tieši iespaido elektriskā tīkla sprieguma U un elektriskās slodzes svārstības. Sistēmas stabilitāti nodrošina galvenā negatīvā atgriezeniskā saite (6), kurā slēgts strāvas kontroles bloks ar pārvades koeficientu k_6 un laika konstanti T_6 . Bloka inerci rada tajā ieslēgtais R - C filtrs.

Nepieciešamo sistēmas darbības kvalitāti nodrošina negatīvā inerciālā atgriezeniskā saite (7) ar maināmu pārvades koeficientu k_7 un laika konstanti T_7 . Ar inerciālo atgriezenisko saiti aptvertais sistēmas posms (1, 2, 7) un konstanta ātruma izpildmehānisms (3) formē proporcioniāli integrālo impulsregulēšanas likumu.



1. att. Gāzdīzeļa slodzes strāvas automātiskās stabilizācijas sistēmas algoritmiskā struktūrshēma.
Fig. 1. Block-diagram of the current stabilisation system for a gas diesel asynchronous generator.

3. Proporcioniāli integrālā impulsregulatora pārvades funkcija

P - I impulsregulatoru veido komparators (1) ar trīspozīciju komutācijas bloku (2), kurus aptver negatīva inerciāla R - C atgriezeniskā saite (7), un konstanta ātruma izpildmehānisms (3).

Vispirms atrod ekvivalento pārvades funkciju sistēmas posmam ar inerciālo atgriezenisko saiti vispārīgā veidā:

$$W_e(s) = \frac{k_1 k_2}{\frac{k_1 k_2 k_7}{T_7 s + 1} + 1} = \frac{k_1 k_2 (T_7 s + 1)}{(1 + k_1 k_2 k_7) \left(\frac{T_7}{1 + k_1 k_2 k_7} s + 1 \right)},$$

$$\text{jeb } W_e(s) = \frac{k_e (T_7 s + 1)}{T_e s + 1}, \quad (1)$$

kur $k_e = \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 k_2 k_7}$ - ekvivalentā posma statiskais pārvades koeficients;

$T_e = \frac{T_7}{1 + k_1 k_2 k_7}$ - ekvivalentā posma laika konstante, s.

Proporcionāli integrālā impulsregulatora pārvades funkcija:

$$W_r(s) = W_e(s) \cdot W_3(s) = \frac{k_e k_3 (T_7 s + 1)}{(T_e s + 1)(T_3 s + 1)s} \quad (2)$$

Tā kā trīspozīciju komutācijas bloks (2) ir izteikti nelineārs sistēmas posms, tad tā statistiskais pārvades koeficients k_2 mainās atkarībā no ieejas signāla amplitūdas. Līdz ar to regulatora koeficienti k_e un T_e nav konstanti. Lai "iesaldētu" $P-I$ impulsregulatora mainīgos koeficientus, t.i. aizstātu tos ar konstantiem koeficientiem, tā pārejas procesa raksturliņķni linearizē (A. Kļujevs, 1989). Šādu linearizētu impulsregulatoru var aprakstīt ar vienkāršotu pārvades funkciju

$$W_r(s) = \frac{k_p (T_7 s + 1)}{T_7 s (T_3 s + 1)}, \quad (3)$$

kas inženierpraksē pietiekami precīzi apraksta pārejas procesu.

Izteiksmē (3) koeficients $k_p = \omega_{nom} T_7 / (U_m k_7)$ ir regulatora proporcionālā posma statistiskais pārvades koeficients (rad/V), kur ω_{nom} - izpildmehānisma nominālā rotācijas frekvence, rad/s; U_m - izpildmehānisma nominālais spriegums, V.

Lai salīdzinātu pārvades funkcijas (2) un (3), izteiksmi (3) pārrakstām sekojošā formā:

$$W_r'(s) = \frac{k_e' k_3 (T_7 s + 1)}{s (T_3 s + 1)}, \quad (4)$$

kur $k_3 = \omega_{nom} / U_m$ - izpildmehānisma ātruma koeficients, rad/(s*V);

$k_e' = 1 / k_7$ - vienkāršota ekvivalentā posma statistiskais pārvades koeficients.

Analīze parāda, ka izpildās nosacījums:

$$k_1 k_2 k_7 \gg 1 \quad (5)$$

Tad $k_e \approx k_e'$, bet $T_e \ll T_7$. Tātad, ja ir spēkā nosacījums (5), tad abu algoritmu (2) un (3) statistiskā jutība ir aptuveni vienāda, bet pārejas procesa dinamiku galvenokārt nosaka laika konstante T_7 .

Tā kā $P-I$ impulsregulatora pašsvārstības notiek tikai ap tā nevienmērības zonu ε ar mazu amplitūdu $A \approx \pm \varepsilon / 2$, tad arī koeficienta k_2 izmaiņas nav būtiskas. Tas dod iespēju "iesaldēt" koeficientus k_e un T_e un izmantot regulatora algoritmu (2) sistēmas analīzei.

4. Sistēmas algoritmi un parametri

Lai novērtētu asinhronā ģenerators slodzes strāvas ASS stabilitāti un darbības kvalitāti, sastādīti sistēmas algoritmi.

Vajējas sistēmas pārvades funkcija:

$$W(s) = W_r(s) \cdot W_4(s) \cdot W_5(s) = \frac{k_e k_3 k_4 k_5 (T_7 s + 1)}{(T_e s + 1)(T_3 s^2 + s)(T_5 s + 1)} \quad (6)$$

Slēgtas sistēmas pārvades funkcija:

$$\phi(s) = \frac{1}{\frac{1}{W(s)} + \frac{k_6}{T_6 s + 1}} = \frac{k_e k_3 k_4 k_5 (T_6 s + 1)(T_7 s + 1)}{(T_e s + 1)(T_3 s^2 + s)(T_5 s + 1)(T_6 s + 1) + k_e k_3 k_4 k_5 k_6 (T_7 s + 1)} \quad (7)$$

Slēgtās sistēmas operatorvienādojums:

$$\begin{aligned} \Delta I(s) \left[(T_e s + 1)(T_3 s^2 + s)(T_5 s + 1)(T_6 s + 1) + k_e k_3 k_4 k_5 k_6 (T_7 s + 1) \right] = \\ = \Delta U_a(s) k_e k_3 k_4 k_5 (T_6 s + 1)(T_7 s + 1), \end{aligned} \quad (8)$$

kur $\Delta I(s)$ – asinhronā ģenerators slodzes strāvas izmaiņas attēlfunkcija;

$\Delta U_a(s)$ - sistēmas ieejas sprieguma izmaiņas attēlfunkcija.

Funkcija (7) liecina, ka sistēmas iedarbes operators

$Q(s) = k_e k_3 k_4 k_5 (T_6 s + 1)(T_7 s + 1)$ ir otrās kārtas polinoms, bet sistēmas pašoperators

$D(s) = (T_e s + 1)(T_3 s^2 + s)(T_5 s + 1)(T_6 s + 1) + k_e k_3 k_4 k_5 k_6 (T_7 s + 1)$ ir piektās kārtas polinoms. Tā kā pašoperatora kārtā ir augstāka par iedarbes operatora kārtu, tad izpildās viens no nepieciešamajiem sistēmas stabilitātes nosacījumiem. Taču tas nav pietiekami. Lai kompleksi novērtētu sistēmas stabilitāti, jānosaka sistēmas nulles un polus, kurus var aprēķināt pielīdzinot nullei sistēmas iedarbes operatoru un pašoperatoru, un nosakot iegūto algebrisko vienādojumu saknes: S_{01}, S_{02} - nulles; S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 - polus. Lai to realizētu, vispirms noteikti sistēmas posmu statistiskie un dinamiskie rādītāji.

1. Komparatora ar nevienmērības zonu statistiskais pārvades koeficients $K_1=30$.
2. Trīspozīciju releja nominālais pārvades koeficients izteikts ar nominālā izejas sprieguma attiecību pret releja nostrādes spriegumu $K_2=U_{nom}/U_{kp} \approx 15$.
3. Elektriskā izpildmehānisma ātruma koeficients:
 $k_3=\omega_{nom}/U_{nom} \approx 0.002 \text{ rad/(sV)}$.
 Laika konstante $T_3 \approx 0.05 \text{ s}$.
4. Gāzes ventiļa statisko pārvades koeficientu nosaka kā gāzes plūsmas izmaiņas Δq (litri sekundē) attiecību pret gāzes ventiļa pagrieziena leņķa izmaiņu $\Delta\alpha$ (rad.):
 $k_4=\Delta q/\Delta\alpha=5\text{l/(s.rad)}$.
5. Gāzdīzeļa elektroģenerators ar jaudu 75 kW statistiskais pārvades koeficients izsakāms kā ģenerators slodzes strāvas izmaiņas ΔI attiecība pret gāzes plūsmas izmaiņu Δq :
 $k_5=\Delta I/\Delta q=60\text{A.s/l}$.
6. Laika konstante, kas raksturo gāzdīzeļa elektroģenerators inerci, $T_5 \approx 1\text{s}$.
7. Galvenās atgriezeniskās saites pārvades koeficients: $k_6=\Delta U_s/\Delta I=0.1 \text{ V/A}$ un laika konstante $T_6 \approx 0.05 \text{ s}$.
8. Inerciālās atgriezeniskās saites pārvades koeficienta k_7 un laika konstantes T_7 vērtības izvēlas sistēmas sintēzes procesā, novērtējot tās stabilitāti, ātrdarbību, svārstīgumu un maksimālo pārregulējumu pārejas procesa laikā.

Sistēmas analīze veikta ar datoru, izmantojot lineāro sistēmu analīzes programmu. Lai gan dotā sistēma satur nelineāru posmu, trīspozīciju releju, tai var piemērot lineāro sistēmu analīzes teoriju, jo inerciālā atgriezeniskā saite realizē trīspozīciju releja raksturīknes impulsveida linearizāciju.

5. Rezultātu analīze

Sistēmas analīzes rezultāti apkopoti 1., 2. tabulās un parādīti 2., 3. attēlu raksturīkņēs. Izpētīti 3 varianti pie sekojošiem inerciālās atgriezeniskās saites parametriem:

- 1) $k_7=0.03, T_7=0.35 \text{ s}$; 2) $k_7=0.03, T_7=0.7 \text{ s}$; 3) $k_7=0.015, T_7=0.7 \text{ s}$.

Sistēmas iedarbes operatorvienādojuma $k_e k_3 k_4 k_5 (T_6 s + 1)(T_7 s + 1) = 0$ sakņu (jeb nullu) S_{01} un S_{02} , kā arī sistēmas pašoperatorvienādojuma (jeb raksturīgā vienādojuma) $(T_e s + 1)(T_3 s^2 + s)(T_5 s + 1)(T_6 s + 1) + k_e k_3 k_4 k_5 k_6 (T_7 s + 1) = 0$ sakņu (jeb polu) S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 vērtības sakopotas 1. tabulā, bet to izvietojums kompleksajā plaknē ($\xi, j\omega$) parādīts 2. attēlā. Kā zināms no automatiskās vadības teorijas, jo tuvāk raksturīgā vienādojuma saknes atrodas kompleksās plaknes kreisajai pusplaknei, jo sistēma ir nestabilāka. Kompleksu sakņu gadījumā sistēmas

1. tabula/Table 1

Slēgtas sistēmas operatorvienādojumu saknes
Roots of operator equations of a closed-loop system

Saknes Roots	Vērtības/Values		
	1. $K_7=0.03,$ $T_7=0.35$ s	2. $K_7=0.03,$ $T_7=0.7$ s	3. $K_7=0.015,$ $T_7=0.7$ s
S_{01}	-2.86	-1.43	-1.43
S_{02}	-20	-20	-20
S_1	$-0.76 + j 1.20$	$-1.26 + j 0.89$	$-2.93 + j 2.62$
S_2	$-0.76 - j 1.20$	$-1.26 - j 0.89$	$-2.93 - j 2.62$
S_3	-15.2	$-24.5 + j 6.16$	$-22.2 + j 5.7$
S_4	-2.49	$-24.5 - j 6.16$	$-22.2 - j 5.7$
S_5	-40.9	-10.2	-1.9

pārejas process ir svārstīgs. Jo tuvāk kompleksās saknes atrodas kreisajai pusplaknei, jo sistēma ir svārstīgāka un lielāks ir tās pārregulējums.

2. tabula/Table 2

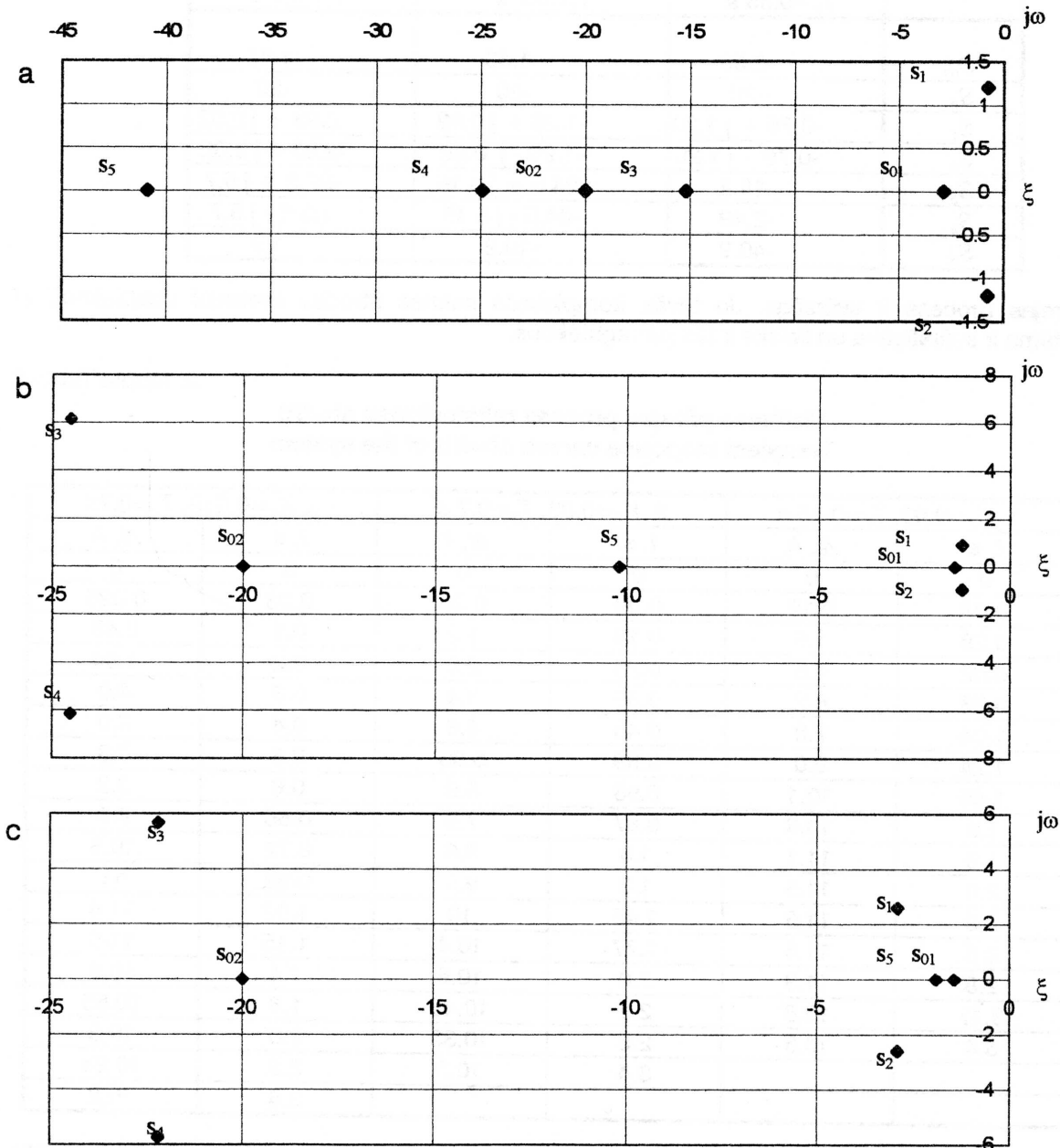
Sistēmas pārejas procesa raksturliķnes $\Delta I=f(t)$
Transient response curves $\Delta I=f(t)$ of the system

1. $K_7=0.03, T_7=0.35$ s		2. $K_7=0.03, T_7=0.7$ s		3. $K_7=0.015, T_7=0.7$ s	
t, s	$\Delta I, A$	t, s	$\Delta I, A$	t, s	$\Delta I, A$
0	0	0	0	0	0
0.07	0.12	0.09	0.29	0.03	0.025
0.28	1.5	0.18	1.2	0.1	0.43
0.62	4.5	0.28	2.3	0.2	1.94
0.83	6.2	0.36	3.4	0.3	4.0
1.04	7.8	0.45	4.6	0.4	6.0
1.24	9.0	0.59	5.83	0.5	7.8
1.45	10.1	0.68	6.6	0.6	9.2
1.6	10.6	0.87	7.6	0.66	9.9
1.8	11.1	1.0	8.6	0.72	10.5
2.0	11.5	1.3	9.6	0.82	11
2.3	11.6	1.45	10	1.02	11.4
2.5	11.5	1.77	10.4	1.15	11.3
2.8	11.3	2.0	10.5	1.4	10.9
3.17	10.8	2.2	10.45	1.6	10.53
3.4	10.5	2.5	10.35	2.0	10.3
		3.4	10.3	2.6	10.25
				3.4	10.2

Sistēmas nulles S_{01}, S_{02} negatīvi iespaido pārejas procesu, jo palielina sistēmas pārregulējumu. Palielinot laika konstanti T_7 no 0.35 s līdz 0.7 s, sistēmas minimālā nulle S_{01} samazinās divas reizes. Tā rezultātā sistēmas maksimālais pārregulējums samazinās no $\sigma_1=16$ % līdz $\sigma_2=5$ % (3. att.). Vienlaicīgi palielinās sistēmas stabilitātes rezerve, jo raksturīgā vienādojuma komplekso sakņu S_1, S_2 reālās daļas $\xi_1=\xi_2$ attālinās no sistēmas stabilitātes robežas. $|\xi_{1,2}|$ palielinās no 0.76 līdz 1.26.

Pētījumi parāda, ka inerciālās atgriezeniskās saites laika konstante T_7 jāsamazina ar dīzeļģenerators laika konstanti T_5 un jāizvēlas robežās $T_7=(0.6...1)T_5$. Lai iegūtu aperiodisku

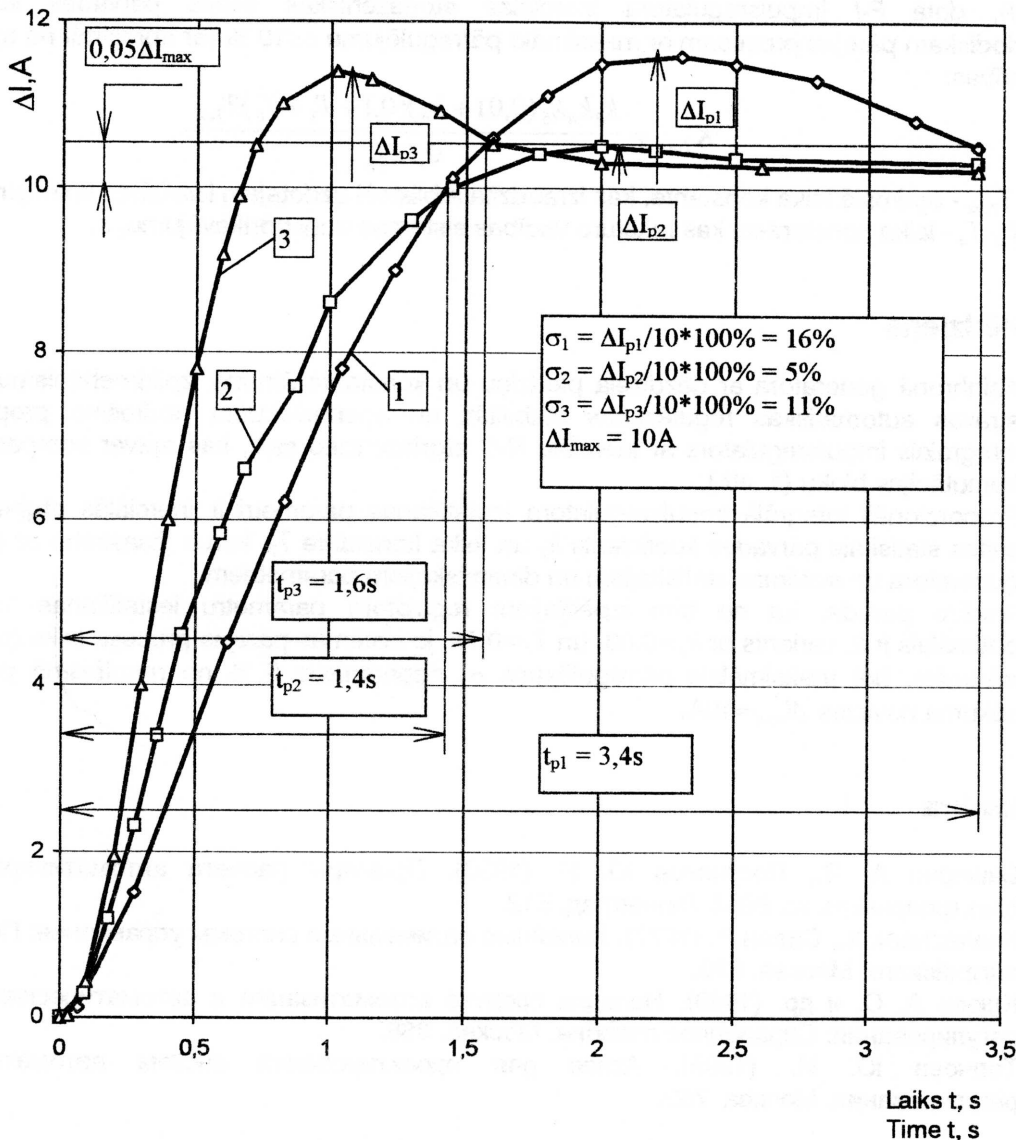
pārejas procesu ar mazu pārregulējumu $\sigma \leq 10\%$, laika konstante T_7 jāizvēlas robežās $T_7 = (0.6 \dots 0.7)T_5$. Izvēloties $T_7 \approx T_5$ iegūst pārejas procesu ar minimālu integrālā kvadratiskā kvalitātes kritērija vērtību $I_{\min} = \int_0^{\infty} \Delta I(t)^2 dt$, kur $\Delta I(t)$ - asinhronā ģenerators strāvas novirze attiecībā pret uzdoto vērtību.



2. att. Sistēmas nulļu (S_{01}, S_{02}) un polu (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5) izvietojums kompleksajā plaknē:
Fig. 2. Location of the system's zeroes (S_{01}, S_{02}) and poles (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5) on the complex plane:

- a - $K_7=0.03$; $T_7=0.35$ s; $S_{01}=-2.86$; $S_{02}=-20$; $S_{1,2}=-0.76 \pm j1.20$; $S_3=-15.2$; $S_4=-25$; $S_5=-41$;
 b - $K_7=0.03$; $T_7=0.7$ s; $S_{01}=-1.43$; $S_{02}=-20$; $S_{1,2}=-1.26 \pm j1.20$; $S_{3,4}=-24.5$; $S_5=-10.2$;
 c - $K_7=0.015$; $T_7=0.7$ s; $S_{01}=-1.43$; $S_{02}=-20$; $S_{1,2}=-2.9 \pm j1.20$; $S_{3,4}=-22 \pm j5.6$; $S_5=-1.9$.

Ja $T_7=0.7$ s ($T_s=1$ s) un $k_7=0.03$, tad ģenerators strāvas izlāgojuma ΔI regulēšanas jeb pārejas procesa laiks pieaug 2.5 reizes, pie tam maksimālais pārregulējums sasniedz 16 % no maksimālās novirzes $\Delta I=10$ A (3. att.).



3. att. Sistēmas pārejas procesa raksturlīknes $\Delta I = f(t)$:

Fig. 3. Transient response curves $\Delta I = f(t)$ of the system:

1 - $K_7 = 0.03$; $T_7 = 0.35$ s;

2 - $K_7 = 0.03$; $T_7 = 0.7$ s;

3 - $K_7 = 0.015$; $T_7 = 0.7$ s;

ΔI_{p1} , ΔI_{p2} , ΔI_{p3} - absolūtais maksimālais pārregulējums / absolute maximum overshoot;

σ_1 , σ_2 , σ_3 - relatīvais maksimālais pārregulējums, % / relative maximum overshoot;

t_{p1} , t_{p2} , t_{p3} - pārejas procesa laiki, s / transient response time, s.

Trešajā variantā, atstājot laika konstanti $T_7=0.7$ s, tika samazināts pārvades koeficients no $k_7=0.03$ līdz $k_7=0.015$. Tā rezultātā, atbilstoši izteiksmei (1), palielinājās laika konstante T_e un pārvades koeficients k_e . Sakarā ar T_e palielināšanos izpildmehānisms ilgāku laiku darbojas ar maksimālo ātrumu, līdz ar to paātrinās regulēšanas process salīdzinājumā ar 2. variantu, taču vienlaicīgi pieaug arī sistēmas svārstīgums, jo palielinās tās kopējais pastiprinājuma koeficients

(3. att.). Pārvades koeficienta izvēli nosaka sistēmas kopējā pastiprinājuma koeficienta ierobežojums attiecībā uz sistēmas svārstīgumu.

Nemot par pamatu *P-I* standartregulatora pārvades koeficienta iestatīšanas kritērijus (A. Kļujevs, 1989), dotā *P-I* impulsregulatora inerciālās atgriezeniskās saites pārvades koeficientu aperiodiskam pārejas procesam ar maksimālo pārregulējumu $\sigma \leq 10\%$ var aprēķināt no aptuvenas saakarības:

$$K_{7opt} = \frac{k_3 k_4 k_5 (0,01 + k_6) (0,1 + T_3 + T_6) T_{7opt}}{0,32 T_5}, \quad (9)$$

kur T_{7opt} - optimālā laika konstante, kas izraudzīta atbilstoši uzdotajam kvalitātes kritērijam, s;
 T_3, T_6 - laika konstantes, kas raksturo vadības sistēmas transportkavējumu, s.

5. Slēdziens

1. Asinhronā ģenerators ar gāzdīzeļa piedziņu un konstanta ātruma izpildmehānismu slodzes strāvas automātiskās regulēšanas stabilitāti un aperiodiskumu nodrošina proporcionāli integrālais impulsregulators ar inerciālu *R-C* atgriezenisko saiti, kas aptver komparatoru un komutācijas bloku (1. att.).
2. Proportcionāli integrālā impulsregulatora iestatīšanas parametri ir inerciālās atgriezeniskās saites statiskais pārvades koeficients k_7 un laika konstante T_7 , kurus jāsaaka ar gāzdīzeļa ģenerators un sistēmas statiskajiem un dinamiskajiem parametriem.
3. Analīze parāda, ka no trim izpētītajiem regulatora parametru iestatīšanas variantiem optimālais ir 2. variants ar $k_7=0.03$ un $T_7=0.7s$, jo sistēmas pārejas procesa laiks $t_{p2}=1,4s$ ir minimāls, bet maksimālais pārregulējums σ_2 nepārsniedz 5 % no regulējamā parametra sākuma novirzes $\Delta I_{max}=10A$.

Literatūra

1. Башарин А. В., Постников Ю. В. (1990). Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Ленинград. 512.
2. Квакернаак Х., Сиван Р. (1977). Линейные оптимальные системы управления: Перевод с английского. Москва. 650.
3. Ключев А. С. и др. (1989). Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. Москва. 368.
4. Топчиев Ю. И. (1989). Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. Москва. 752.