

UPOREDNA ANALIZA RELEJNOG EKSPERIMENTA I FAZNO ZAKLJUČANE PETLJE ZA ODREĐIVANJE KRITIČNE UČESTANOSTI I KRITIČNOG POJAČANJA PROCESA

Tomislav B. Šekara, Miroslav R. Mataušek, tomi@etf.rs, matausek@etf.rs
 Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj - U radu će biti analizirano nekoliko metoda zasnovanih na relejnom eksperimentu i fazno zaključanoj petlji (PLL) za efikasno određivanje kritične učestanosti, kritičnog pojačanja kao i procjene Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\arg\{G_p(i\omega)\}$. U cilju praktične primjene ovih prilaza u prisustvu viših harmonika, mjernog šuma i poremećaja opterećenja procesa, primijenjen je adaptivni filter (AF) tipa propusnika opsega. Metode su testirane na širokoj klasi tipičnih industrijskih procesa. Data je realizacija algoritama u SIMULINK-u.

Abstract –Several methods, based on the relay experiment and phase-locked loop (PLL), for effective determination of the ultimate frequency, ultimate gain and Nyquist curve $G_p(i\omega)$ for given $\arg\{G_p(i\omega)\}$, are analyzed in this paper. To support the practical application of these algorithms in the presence of the higher harmonics, the measurement noise and load disturbance, adaptive filter (AF) of the bandpass type is applied. Methods are tested on a large class of typical industrial processes. SIMULINK realization of the algorithms are presented.

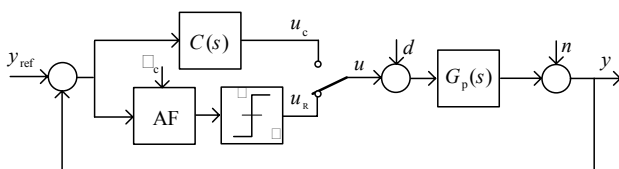
Ključne riječi – PID regulator, Frekvencijski domen, Konvencionalni relej, PLL

Key words – PID controller, Frequency domain, Conventional relay, PLL

1. UVOD

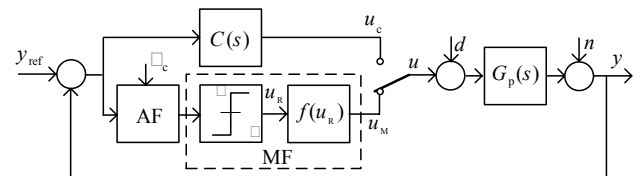
Od početnog rada Ziegler-Nicholsa [1] iz 1942 i unapređene predložene metode od strane Åströma i Hägglunda [2] 1984, poznate kao konvencionalni relejni eksperiment (KR), metod generisanja stabilnih oscilacija i dalje se koristi u cilju dinamičke karakterizacije procesa. Pouzdane procjene kritične učestanosti ω_c i kritičnog pojačanja k_c procesa $G_p(s)$ predstavljaju važne informacije u cilju određivanja adekvatnog regulatora. Faktori koji utiču na tačnost procjene ω_c i k_c primjenom konvencionalnog relejnog eksperimenta su: nedovoljno isfiltrirani viši harmonici od strane procesa, prisustvo poremećaja opterećenja d i mjernog šuma n . Uticaj neisfiltriranih viših harmonika na tačnost ω_c i k_c je otklonjen u [3] primjenom modifikovanog releja (MF). Dalje unapređenje u [4,5] za određivanje ω_c i k_c , nešto složenijom metodom, koristi princip fazno zaključane petlje (PLL) sa adekvatnim adaptivnim filtrom tipa propusnika opsega. Ova PLL metoda za određivanje ω_c i k_c , je otklonila skoro sve nedostatke u odnosu na konvencionalni relejni eksperiment.

Osnovne strukture šeme za prethodno navedene metode su prikazane na sljedećim slikama

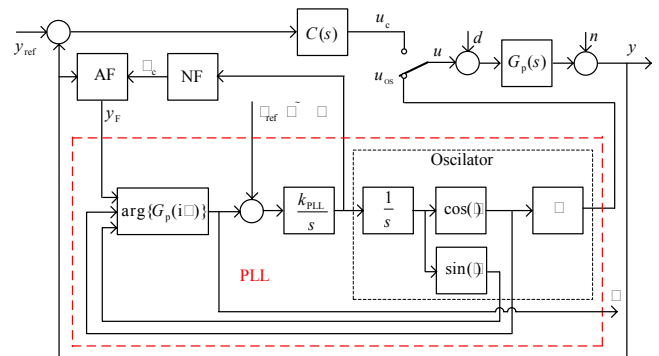


Slika 1. Osnovna šema sa konvencionalnim relejom KR za određivanje ω_c i k_c procesa $G_p(s)$, $AF \equiv I$.

U ovom radu biće pokazano da primjena adaptivnog filtra AF tipa propusnika opsega (Slika 1) omogućava da se sa konvencionalnim relejom pouzdano odrede ω_c i k_c procesa $G_p(s)$ u prisustvu poremećaja opterećenja i mjernog šuma.



Slika 2. Osnovna šema sa modifikovanim relejom MF za određivanje ω_c i k_c procesa $G_p(s)$, $AF \equiv I$.



Slika 3. Osnovna šema sa PLL-om za određivanje ω_c i k_c procesa $G_p(s)$ sa adaptivnim filtrom AF tipa propusnika opsega i niskopropusnim filtrom NF (PLL-f)

Takođe biće pokazano da primjena tog filtra kod MF (Slika 2) omogućava pored pouzdanog određivanja ω_c i k_c procesa $G_p(s)$ u prisustvu poremećaja opterećenja i mjernog šuma, i pouzdanu procjenu Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\theta_{ref} = \arg\{G_p(i\omega)\}$. Konačno primjenom AF biće dato unapređenje PLL metode predložene u [4] za određivanje ω_c , k_c i procjenu Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti θ_{ref} , bez isključenja regulatora $C(s)$.

Pored AF filtra, uvođenje niskopropusnog filtra NF čini PLL prilaz robusnim u cilju efikasnog određivanja ω_c , k_c i procjenu Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti θ_{ref} . U radu [5] korišćena je jedna ćelija AF filtra, prikazana na slici 6.

2. ANALIZA

Modifikacija osnovnih šema sa konvencionalnim relejom i MF, za određivanje ω_c i k_c procesa $G_p(s)$, uključuje adaptivni filter tipa propusnika opsega. To znači da se na slici 1 i slici 2, blok AF realizuje primjenom kaskade filtera definisanom funkcijom prenosa

$$F(s) = \prod_{m=1}^4 \frac{\beta_m \omega_c s}{s^2 + \beta_m \omega_c s + \omega_c^2}, \quad \beta_m = 2 \cos(\pi(2m-1)/16). \quad (1)$$

Na osnovu harmonijske analize [6] karakteristična jednačina konvencionalnog releja sa filterom (1) je

$$1 + \frac{4\mu}{\pi A_1} G_p(i\omega_c) F(i\omega_c) = 0. \quad (2)$$

Kako je $F(i\omega_c)=1$ to se (2) svodi na

$$1 + \frac{4\mu}{\pi A_1} G_p(i\omega_c) = 0. \quad (3)$$

Iz (2)-(3) slijedi da je procjena kritične učestanosti i kritičnog pojačanja jednaka vrednostima ω_c i k_c procesa $G_p(s)$. Pri tome je u jednačinama (2)-(3)

$$k_c = \frac{4\mu}{\pi A_1}, \quad (4)$$

gdje je A_1 amplituda prvog harmonika Fourijeovog razvoja izlaznog signala iz filtra (1). S obzirom da je kaskada filtera uskopojasni propusnik opsega to su svi harmonici osim osnovnog $\omega=\omega_c$ potisnuti. Isto se odnosi i na visokofrekventni mjerni šum i na poremećaj opterećenja. Time su otklonjeni svi naprijed pomenuti nedostaci konvencionalnog relejnog eksperimenta iz [2].

Potrebna uslov za stabilnost graničnog kruga definisanog relacijom (2) dat je sa [7]

$$\left. \frac{\partial \text{Im}(G_p(i\omega)F(i\omega))}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_c} > 0. \quad (5)$$

odnosno

$$\left. \frac{\partial \text{Im} G_p(i\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_c} + \frac{2}{k_c \omega_c \beta_0} > 0, \quad (6)$$

gdje je $\beta_0 = 1/\sum_{m=1}^4 1/\beta_m$. Pod uslovom da rješenje definisano relacijom (3) zadovoljava potreban uslov za stabilnost graničnog kruga tim prije je, na osnovu relacije (6), ovaj uslov zadovoljen za granični krug definisan relacijom (2).

Struktura prikazana na slici 2 sa blokom AF realizovanim primjenom kaskade filtera (1) u prednosti je nad strukturom prikazanom na slici 1 sa blokom AF samo u slučaju procjene Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti θ_{ref} .

Struktura prikazana na slici 3 pored dobrih osobina u odnosu na određivanje ω_c , k_c i procjene Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti θ_{ref} , ima sledeće nedostatke. Podešavanje parametra k_{PLL} u regulatoru k_{PLL}/s zavisi od testiranog procesa $G_p(s)$. Ako je testirani proces nestabilan struktura PLL sa slike 3 je neprimjenljiva za bilo koju vrijednost parametra k_{PLL} . Međutim, generalizacija ovog koncepta sa PLL predložena u [4] je primjenljiva i za nestabilne procese. Međutim, u oba prilaza [4,5], u slučaju višestrukog rješenja jednačine

$$\arg\{G_p(i\omega)\} = \theta_{ref}, \quad (7)$$

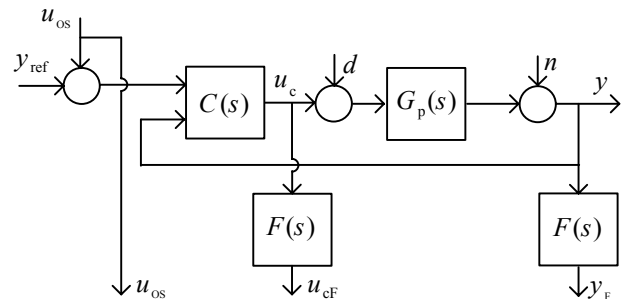
kao i za ona rješenja čiji je $\arg\{G_p(i\omega)\} > 2\pi$, PLL koncept zahtijeva apriorno poznavanje učestanosti od interesa. To znači i sledeće: ako se određuje ω_c a pođe se od početnog pogađanja koje je blisko nekom drugom rješenju jednačine (7) za $\theta_{ref} = -\pi$ neće biti određena kritična učestanost razmatranog procesa $G_p(s)$. U tom smislu koncepti zasnovani na primjeni releja imaju prednost jer daju jedinstveno rješenje.

Na slici 4 prikazana je šema sa PLL-om za određivanje ω_c i k_c procesa $G_p(s)$ iz sistema upravljanja u radu. Za razliku od do sada razmatranih struktura, u ovom prilazu regulator $C(s)$ se ne isključuje. Rješenja predloženo u [4] za eliminaciju uticaja mjernog šuma koristi Kalmanov filter a za eliminaciju uticaja poremećaja opterećenja koristi posebnu tehniku usrednjavanja. U ovom radu primjenom AF filtra eliminisani su problemi sa mjernim šumom i poremećajem opterećenja. Na ovaj način primjenom AF, značajno je pojednostavljena implementacija a time i adekvatna primjena PLL koncepta na sistem u zatvorenoj povratnoj sprezi sa regulatorom $C(s)$ u radu i procesom $G_p(s)$.

Primjena PLL koncepta na sistem u zatvorenoj povratnoj sprezi sa uključenim filterom (1) kao što je prikazano na slici 4, slijedi direktno iz relacija

$$\arg\left\{\frac{Y_F(i\omega)}{U_{OS}(i\omega)}\right\} - \arg\left\{\frac{U_{CF}(i\omega)}{U_{OS}(i\omega)}\right\} = \arg\{G_p(i\omega)\} \quad (8)$$

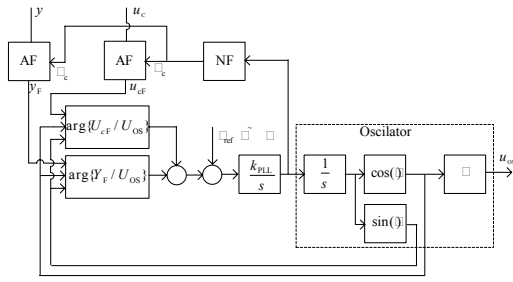
$$\left|\frac{Y_F(i\omega)}{U_{OS}(i\omega)}\right| \div \left|\frac{U_{CF}(i\omega)}{U_{OS}(i\omega)}\right| = |G_p(i\omega)| \quad (9)$$



Slika 4. Sistem u zatvorenoj povratnoj sprezi sa uključenim filterom (1) u cilju primjene PLL koncepta na regulacioni sistem u radnom režimu

Kritično pojačanje k_c na osnovu (9) se direktno dobija iz odnosa osnovnih harmonika Fourijeovog razvoja izlaznih signala u_{cf} i y_F iz AF

$$k_c = A_{1CF} / A_{1F}. \quad (10)$$



Slika 5. Modifikovana šema primjene PLL koncepta za regulacioni sistem u radnom režimu za određivanje ω_c i k_c procesa $G_P(s)$ sa adaptivnim filtrom AF tipa propusnika opsega i niskopropusnim filtrom NF (MPLL-f)

3. SIMULACIONI REZULTATI

Upoređenje prethodno analiziranih metoda je dato u Tabeli 1. za četrnast reprezentativnih tipičnih dinamičkih karakteristika industrijskih procesa sa funkcijama prenosa

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{(s+1)^4}, \quad G_{p2}(s) = 1/\prod_{k=0}^3(0.7^k s + 1), \quad G_{p3}(s) = \frac{12.8e^{-s}}{16.8s + 1},$$

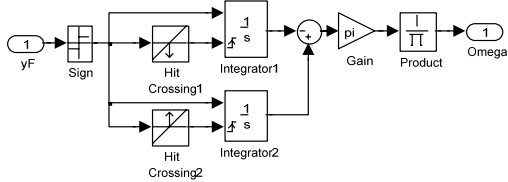
$$G_{p4}(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^3}, \quad G_{p5}(s) = \frac{10}{(s+1)(0.7s+1)(0.1s+1)}, \quad G_{p6}(s) = e^{-\sqrt{s}},$$

$$G_{p7}(s) = \frac{1-2s}{(s+1)^3}, \quad G_{p8}(s) = \frac{1}{\cosh \sqrt{2s}}, \quad G_{p9}(s) = \frac{1}{s(s+1)^3},$$

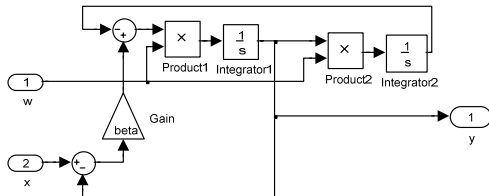
$$G_{p10}(s) = \frac{9}{(s+1)(s^2+2s+9)}, \quad G_{p11}(s) = \frac{(s+0.2)e^{-0.5s}}{s^2+s+1},$$

$$G_{p12}(s) = \frac{4e^{-2s}}{4s-1}, \quad G_{p13}(s) = \frac{e^{-s}}{s}, \quad G_{p14}(s) = \frac{1.078e^{-10s}}{s^2+0.14s+0.49}.$$

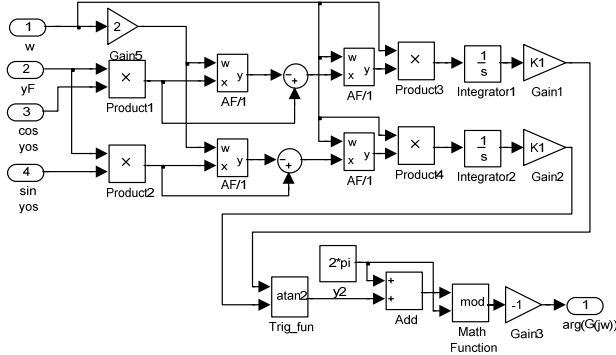
Za određivanje učestanosti kod metoda sa relejom korišćena je Simulink šema prikazana na slici 6



Slika 6. Simulink šema za određivanje dominantne učestanosti signala na izlazu AF filtra



Slika 6. Simulink šema AF/1 jedne ćelije AF filtra

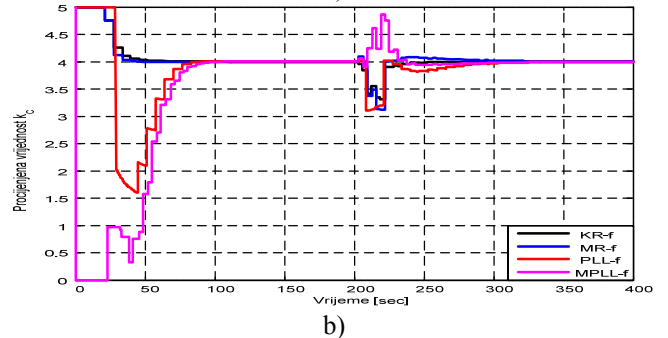
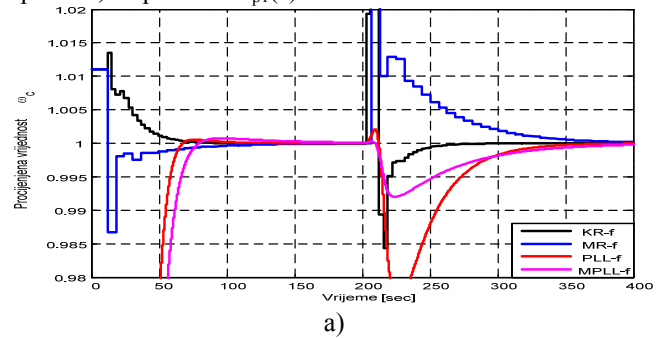


Slika 7. Simulink šema za određivanje argumenta θ iz intervala $0 < \theta < 2\pi$, gdje je $K_1 = 1/\beta$ i AF/1 jedna ćelija AF filtra za usvojeno $\beta = \sqrt{2}$.

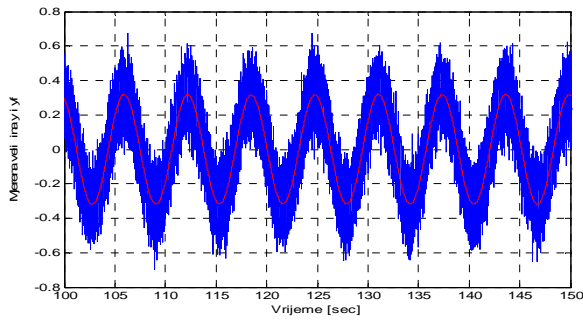
$G_{pj}(s)$	Tačno	KR	MR	KR-f	MR-f	PLL-f	MPLL-f
ω_c/k_{c1}	1.000	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
k_{c1}	4.000	3.945	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
ω_c/k_{c2}	1.707	1.693	1.707	1.707	1.707	1.707	1.707
k_{c2}	4.659	4.581	4.659	4.659	4.659	4.659	4.659
ω_c/k_{c3}	1.608	1.616	-	1.606	1.608	1.608	1.608
k_{c3}	2.112	2.127	-	2.109	2.112	2.112	2.112
ω_c/k_{c4}	0.400	0.410	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
k_{c4}	1.249	1.262	1.249	1.249	1.249	1.249	1.249
ω_c/k_{c5}	3.684	3.613	3.684	3.685	3.684	3.684	3.684
k_{c5}	1.311	1.258	1.311	1.312	1.311	1.311	1.311
ω_c/k_{c6}	19.74	19.31	19.74	19.73	19.74	19.74	19.74
k_{c6}	23.14	22.43	23.14	23.13	23.14	23.14	23.14
ω_c/k_{c7}	0.845	0.788	0.845	0.845	0.845	0.845	0.845
k_{c7}	1.143	1.105	1.143	1.143	1.143	1.143	1.143
ω_c/k_{c8}	9.869	9.679	9.869	9.867	9.869	9.869	9.869
k_{c8}	11.59	11.26	11.59	11.59	11.59	11.59	11.59
ω_c/k_{c9}	0.577	0.567	-	0.577	0.577	0.577	0.577
k_{c9}	0.889	0.860	-	0.889	0.889	0.889	0.889
ω_c/k_{c10}	3.317	3.306	3.317	3.317	3.317	3.317	3.317
k_{c10}	2.667	2.643	2.667	2.667	2.667	2.667	2.667
ω_c/k_{c11}	3.613	3.700	3.613	3.610	3.613	3.613	3.613
k_{c11}	3.478	3.568	3.478	3.475	3.478	3.478	3.478
ω_c/k_{c12}	0.583	0.508	-	-	-	-	0.583
k_{c12}	0.634	0.566	-	-	-	-	0.634
ω_c/k_{c13}	1.571	1.571	-	1.571	1.571	1.571	1.571
k_{c13}	1.571	1.571	-	1.571	1.571	1.571	1.571
ω_c/k_{c14}	0.737	0.737	0.737	0.737	0.737	0.737	0.737
k_{c14}	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108

Tabela 1. Upoređenje metoda KR, MR, KR-f, MR-f, PLL-f i MPLL-f za određivanje ω_c i k_c procesa $G_{Pj}(s)$, $j=1...14$, na reprezentativnim tipičnim industrijskim procesima

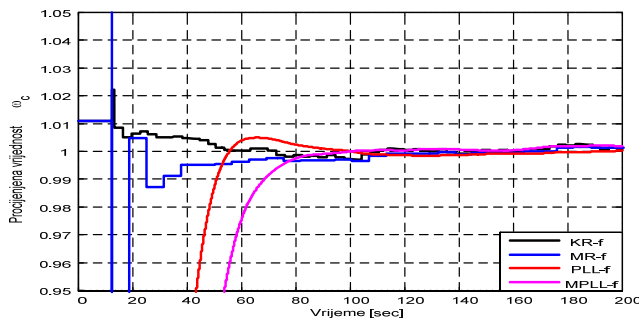
Kao što se da primijetiti na osnovu tabele 1 sve metode teoretski dobro daju ω_c i k_c na onim procesima gdje su primjenjive. Veće razlike ovih metoda za efikasnije određivanje ω_c i k_c na procesima koji su u nekom radnom režimu u prisustvu mjernog šuma i poremećaja opterećenja, biće prikazani na narednim dijagramima, bez umanjavanja opštosti, na procesu $G_{p1}(s)$.



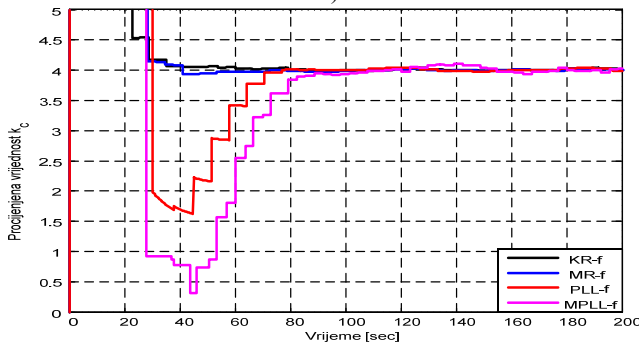
Slika 8. Dinamičke karakteristike procjene kritičnih vrijednosti za proces $G_{p1}(s)$ u prisustvu poremećaja opterećenja $d=2\mu$ nastalog u trenutku $t_0=200$, korišćenjem metoda KR-f, MR-f, PLL-f i MPLL-f a) kritična učestanost ω_c i b) kritično pojačanje k_c , za $T_{nf}=1$ kod PLL metoda.



Slika 8. Vremenski dijagram mjenog signala u šumu tipa "random number" varujanse 0.01 i vremenski dijagram isfiltriranog signala y_f na izlazu AF filtra.

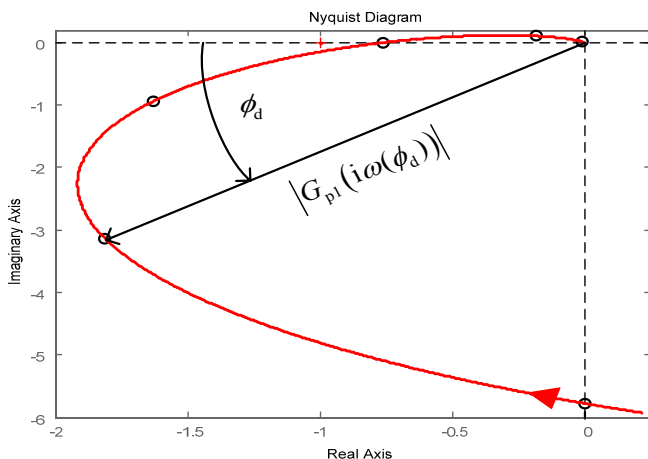


a)



b)

Slika 10. Dinamičke karakteristike procjene kritičnih vrijednosti za proces $G_{p1}(s)$ u prisustvu mjernog šuma tipa "random number" varujanse 0.01, korištenjem metoda KR-f, MR-f, PLL-f i MPLL-f a) kritična učestanost ω_c i b) kritično pojačanje k_c , za $T_{nf}=1$ kod PLL metoda.



Slika 11. Procjene Nyquistove krive $G_{p5}(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\theta_{ref} = \arg\{G_p(i\omega)\} = -\pi + \phi_d$, $\phi_d = \pi/2, \pi/3, \pi/6, 0, -\pi/6, -\pi/3$, primjenom MR-f, PLL-f i MPLL-f.

Napomenimo da je u prethodnoj tabeli 1 gdje je primjenjivana metoda MPLL-f korišten PID regulator projektovan na osnovu [8] i [9]. Istaknimo da je metoda MPLL-f nezavisna od korištenog regulatora i da je primjenjiva na regulacionim procesima čiji parametri regulatora nisu adekvatno podešeni. Na ovaj način je omogućen monitoring parametara ω_c i k_c i pouzdana procjena Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\theta_{ref} = \arg\{G_p(i\omega)\}$ u toku rada procesa i time ostvarena mogućnost za adaptivno podešavanje regulatora bez prekidanja regulacione konture.

4. ZAKLJUČAK

Predložene modifikacije KR-f, MF-f, PLL-f i MPLL-f u cilju adekvatne procjene ω_c , k_c i procjene Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\arg\{G_p(i\omega)\}$ pokazale su se adekvatnim na širokoj klasi tipičnih industrijskih procesa u prisustvu viših harmonika, mjernog šuma i poremećaja opterećenja. Pored uporedne analize na širokoj klasi industrijskih procesa, doprinos rada je i u tome što je korišćenje relejnog eksperimenta u realnim uslovima omogućeno primenom AF filtra. Takođe je modifikacijom PLL metode, za regulacioni sistem u radnom režimu, uvođenjem AF filtra značajno pojednostavljeno određivanje ω_c i k_c i procjena Nyquistove krive $G_p(i\omega)$ za zadate vrijednosti $\arg\{G_p(i\omega)\}$.

REFERENCE

- [1] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-765, 1942.
- [2] K.J. Aström, T. Häggglund, Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica*, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [3] T.H. Lee, Q.G. Wang, K.K. Tan, A modified relay-based technique for improved critical point estimation in process control, *IEEE Trans. Control Syst. Technology*, Vol. 3, pp. 330-337, 1995.
- [4] J. Crowe, M.A. Johnson, Process identifier and its application to industrial control, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 147, pp.196-204, 2000.
- [5] D.W. Clarke, J.W. Park, Phase-locked loops for plant tuning and monitoring. *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 150, pp. 155-169, 2003.
- [6] Е.П. Попов, И.П. Пальтов, *Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем* (in russian) М.: Физматгиз, 1960.
- [7] J.M. Loeb, *Recent advances in nonlinear servo theory*, New York: Macmillan, 1965.
- [8] T.B. Šekara and M.R. Mataušek, "Optimization of PID controller based on maximization of the proportional gain under constraints on robustness and sensitivity to measurement noise", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 54, pp.184-189, 2009.
- [9] T.B. Šekara and M.R. Mataušek, "Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization", *J. Process Control* vol. 20, pp. 360-363, 2010.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RELAY EXPERIMENT AND PHASE-LOCKED LOOP USED TO DETERMINE ULTIMATE FREQUENCY AND ULTIMATE GAIN

Tomislav B. Šekara, Miroslav R. Mataušek