Годишник на Технически Университет – София, том 70, книга 2, 2020
Proceedings of the Technical University – Sofia, Volume 70, Issue 2, 2020

РЕПЕТИТИВНА РЕЖЕКТИРАЩА СМУЩЕНИЯТА *DRC*-СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА РОБОТ-МАНИПУЛАТОР FANUC M-430IA/4FH

Емил Николов, Нина Г. Николова

Резюме: *Предложена и анализирана е репетитивна* $\mathcal{ML}$-**DRC**-*система за управление на индустриален робот-манипулатор. Изследвани са качеството и филтриращите свойства на системата да компенсира ефективно производствени механични вибрации. Представени са резултати от робастния анализ в условия на априорна неопределеност.*

Ключови думи: *Репетитивна* $\mathcal{ML}$-**DRC**-*система за управление, филтрация на механични вибрации, робастен анализ.*

REPETITIVE *DRC*-SYSTEM OF ROBOT-MANIPULATOR FANUC M-430IA/4FH

Emil Nikolov, Nina G. Nikolova

Abstract: *A repetitive* $\mathcal{ML}$-**DRC**-*system for an industrial robot manipulator has been proposed and analyzed. The performance and filtering properties of the system to effectively compensate for production mechanical vibrations have been studied. Results of robust analysis in conditions of a priori uncertainty are presented.*

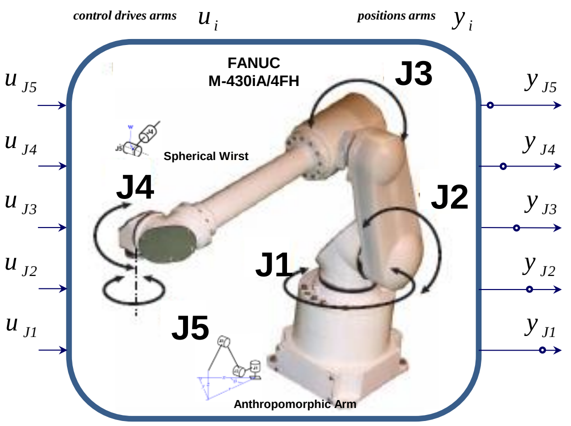
Key words: *Repetitive* $\mathcal{ML}$-**DRC**-*system, mechanical vibration filtration, robust analysis.*

ВЪВЕДЕНИЕ

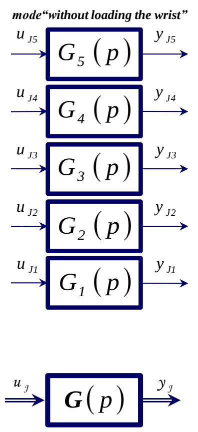
Разглежда се индустриален робот-манипулатор FANUC M-430IA/4FH като обект за управление, представен с конструктивната схема (Фиг. 1), с антропоморфни рамена, сферична работна китка и пет независими оси за управление на движението (5-DOF). Електрозадвижването на робота е с ДПТ с постоянни магнити. Регулиращи величини са управляващите сигнали $u_{J\,i}$ $\left(i \in [1,5]\right)$ към електродвигателите, регулируеми величини са позициите $y_{J\,i}$ $\left(i \in [1,5]\right)$ на рамената на манипулатора. Механичното натоварване на манипулатора от страна на обработвания в производството детайл е означено с ς_M. Структурният **[1-6, 8, 9]** модел (Фиг. 2) отразява и режим *"**without loading the wrist**"* (Фиг. 2а), и експлоатационен режим ***"with max load an wrist"*** (Фиг. 2б). Предавателните функции G_i (1)÷(6), $\boldsymbol{G}$ (7), $\mathbf{G}\left(p,\varsigma\right)$ (8) на електромеханичното задвижване на рамената с отчитане на ς_M са представени в разгърната структура (Фиг. 2в,г). Параметризирани са **[8-9]** в (1)÷(6) – Tabl. 1. Проектирани са **[8-12]** класическа (Фиг. 3) с ***PID***-регулатор $\boldsymbol{R}^*$ (9)÷(11)

ISSN 1311-0829
DOI 10.47978/TUS.2020.70.02.011

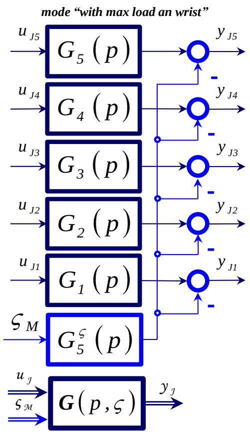
при критерий $\sigma -$ ***критично апериодичен преходен процес*** и робастна (Фиг. 4) ***DRC***-режетираща смущенията (***DRC-Disturbance Rejection Control System***) (12)÷(23) с $\boldsymbol{R}_{DRC}$ (12) системи за управление. ***DRC***-системата се отличава от ***PID***-системата по наличието на вътрешен номинален модел $\boldsymbol{G^*}$ и на ***DRC***-робастен филтър $\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}\ i}$ за всеки локален контур.



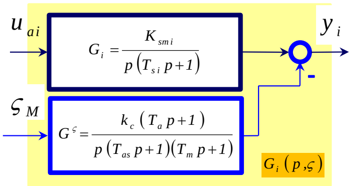
Фиг. 1



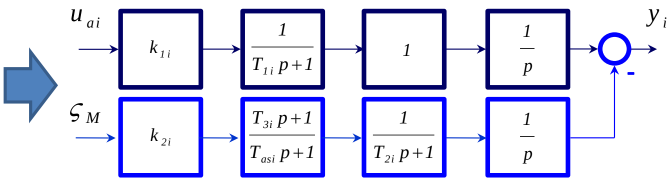
Фиг. 2а



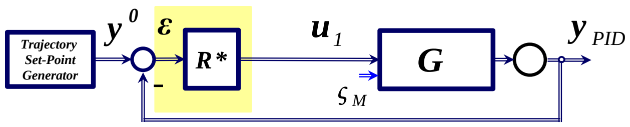
Фиг. 2б



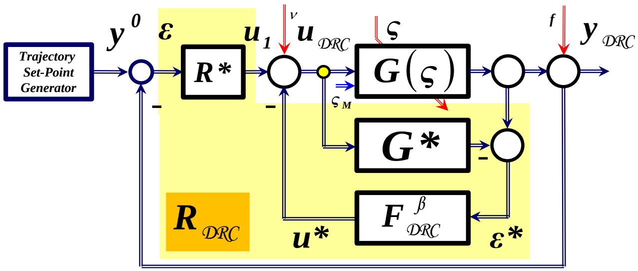
Фиг. 2в



Фиг. 2г



Фиг. 3



Фиг. 4

Табл. 1

G_5	G_4	G_3	G_2	G_1	G^{ς}
$\dfrac{3{,}58}{p\,(0{,}91\,p+1)}$	$\dfrac{3{,}58}{p\,(1{,}05\,p+1)}$	$\dfrac{3{,}58}{p\,(1{,}25\,p+1)}$	$\dfrac{3{,}58}{p\,(1{,}55\,p+1)}$	$\dfrac{3{,}58}{p\,(1{,}91\,p+1)}$	$-\dfrac{0{,}253\,(1{,}5\,p+1)}{p\,(0{,}01\,p+1)(6\,p+1)}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Синтезът **[7,9]** на $\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}\ i}$ (17) се основава на метода на ***балансното уравнение*** при критерий ***минимално отклонение*** $e_{\min}$ ***на траекторията*** $y^{\beta}_{\mathcal{DRC}\ i}$ (19) на параметрично/структурно смутена ***DRC***-система от номиналната траектория $y_{nom\ i}$. Характеристиките на $\boldsymbol{R}^*$ (9) и $\boldsymbol{R}_{DRC}(\varsigma,\varsigma_M)$ (15) са анализирани в **[10]**.

$$G = G^* = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_5 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$\mathbf{G}(p,\varsigma) = \begin{bmatrix} G_1(p,\varsigma) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_2(p,\varsigma) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3(p,\varsigma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_4(p,\varsigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_5(p,\varsigma) \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$R^* = R_{PID} = \begin{bmatrix} R_1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5^* \end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$R_i^*(p) = k_{p\,i} \cdot \frac{\left(T_{i\,i}\,p+1\right)}{T_{i\,i}\,p} \cdot \frac{\left(T_{d\,i}\,p+1\right)}{\left(T_{f\,i}\,p+1\right)} \quad \underset{\{\sigma\,=\,const\}}{\Leftrightarrow} \quad G_i^* = \frac{K_{s\,i}}{p\left(T_{s\,i}\,p+1\right)}, \tag{10}$$

$$R_5^*(p) = 0{,}846\,\frac{(2p+1)}{2p}\,\frac{(1{,}5p+1)}{(0{,}025p+1)} \quad \underset{\{\sigma\,=\,const\}}{\Leftrightarrow} \quad G_5^* = \frac{3{,}58}{p\,(0{,}91p+1)}, \tag{11}$$

$$\boldsymbol{R}_{DRC} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_{DRC1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{R}_{DRC2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{R}_{DRC3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{R}_{DRC4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{R}_{DRC5} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$u_{DRC\,i} = u_{1\,i} - u_i^* = u_{1\,i} - u_{DRC_i}\,\mathcal{F}_{DRC\,i}^{\beta}\left(G_i^{\blacksquare} - G_i^*\right) = \mathcal{R}_{DRC\,i}\,\varepsilon \;, \tag{13}$$

$$\boldsymbol{u}_{DRC_i}\left(1+\boldsymbol{\mathcal{F}}_{DRCi}^{\beta}\left(G_i^{\blacksquare} - G_i^*\right)\right) = R_i^*\,\varepsilon \;;\; \boldsymbol{\mathcal{R}}_{DRCi}\,\varepsilon\left(1+\boldsymbol{\mathcal{F}}_{DRCi}^{\beta}\left(G_i^{\blacksquare} - G_i^*\right)\right) = R_i^*\,\varepsilon \;, \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\mathcal{R}}_{DRCi} = R_i^*\left(1+\boldsymbol{\mathcal{F}}_{DRCi}^{\beta}\left(G_i^{\blacksquare} - G_i^*\right)\right)^{-1} = R_i^*\,\nabla_{DRCi} \;, \tag{15}$$

$$\nabla_{DRCi} = \left(1+\boldsymbol{\mathcal{F}}_{DRCi}^{\beta}\left(G_i^{\blacksquare} - G_i^*\right)\right)^{-1} \;, \tag{16}$$

$$\begin{gathered} \mathcal{F}_{DRC}^{\beta} = \left(\frac{1+p\omega_b^{-1}}{1+p\omega_h^{-1}}\right)^{\beta} \prod_{j=1}^{M}\left(\frac{1+p\left(\omega'_j\right)^{-1}}{1+p\left(\omega_j\right)^{-1}}\right) \underset{\{\forall\,\omega\in[\,\omega_b\,,\,\omega_h\,]\}}{\cong} \left(\mathcal{B}^{\blacksquare}(p)\right)_{func}^{inv}, \\ \left(\omega'_j < \omega_j \;;\; \omega_b < \omega'_1 \;;\; \omega_h > \omega_1 \;; n-1<\beta<n \;;\; \beta = \beta\left(\arg \mathcal{B}^{\blacksquare}, \omega_C^{\left(\mathcal{B}^{\blacksquare}\right)}\right)\right), \\ \left(\mathcal{B}^{\blacksquare} = G^*\left(G^{\blacksquare} - G^*\right)\left(G^{\blacksquare} - 2G^*\right)^{-1}\right), \end{gathered} \tag{17}$$

$$\mathcal{F}_{DRC\;i}^{\beta} \underset{\{[\,e_{min\,i}\,]\to 0\}}{\Leftrightarrow} \; G_i^* = \frac{K_{si}^*}{p\left(T_{si}^*\,p+1\right)} \;;\; G_i^{\blacksquare} = \frac{K_{si}^{\blacksquare}}{p\left(T_{si}^{\blacksquare}\,p+1\right)}, \tag{18}$$

$$\left[e_{\mathcal{DRC}mini}\right] = \left|\left[y_{\mathcal{DRC}i}(\varsigma)\right] - \left[y_{nom\ i}\right]\right| \underset{(G^{\Diamond}\in\Im)}{\rightarrow} 0 \ , \left(\left[y_{\mathcal{DRC}i}(\varsigma)\right] \cong \left[y_{nom\ i}\right]\right), \quad \left(\forall\ G^{\Diamond}(p,\varsigma)\in\left[G_i^{*}(p)\in\Im,\ G_i^{\blacksquare}(p)\in\Im\right],\ \forall\varsigma\in\left[0,\ \varsigma^{\blacksquare}\right]\right), \tag{19}$$

$$\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}5} = 0,846\frac{(2p+1)}{2p}\frac{(1,5p+1)}{(0,025p+1)}\left(1+\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}5}\left(\frac{3,58}{p\ (1,91p+1)}-\frac{3,58}{p\ (0,91p+1)}\right)\right)^{-1}, (\boldsymbol{\beta = 3,105}) \ , \tag{20}$$

$$\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}5} = 0.33\frac{(0,112p+1)}{(7,122p+1)}\cdot\frac{(27,390p+1)}{(0,515p+1)}\cdot\frac{(7,620p+1)}{(0,143p+1)}\cdot\frac{(2,120p+1)}{(0,040p+1)}\cdot\frac{(0,589p+1)}{(0,011p+1)}\cdot\frac{(0,164p+1)}{(0,003p+1)}, (\boldsymbol{\beta = 3,105}) \ , \tag{21}$$

$$\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}5} \underset{\{[e_{min5}]\rightarrow 0\}}{\Leftrightarrow} \quad G_5^{*} = \frac{3,58}{p\ (0,91p+1)}\ ;\ G_5^{\blacksquare} = \frac{3,58}{p\ (1,91p+1)}, (\boldsymbol{\beta = 3,105}) \ , \tag{22}$$

$$\nabla_{\mathcal{DRC}5} = \left(1+\mathcal{F}^{\beta}_{\mathcal{DRC}5}\left(\frac{3,58}{p\ (1,91p+1)}-\frac{3,58}{p\ (0,91p+1)}\right)\right)^{-1} \ , \tag{23}$$

В експлоатационен режим ***"with max load an wrist"*** за параметричните флуктуации ς на обекта (Фиг. 2г) в диапазони Табл. 2 и Табл. 3, манипулаторът е подложен на хармонични $d_i = \sin\ \omega_{pi}\ t$ вибрации с честота ω_{pi} и период τ_{pi} от страна на механичните процедури върху обработвания детайл (Табл. 4.) Целта на настоящата разработка е да се проектира репетитивна система за управление (12) $\div$(23) с $\boldsymbol{R}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$, която ефективно да компенсира отраженията на d_i върху показателите на качеството. Поставени са задачи за синтез на съответните репетитивни филтри и анализ на качеството на проектираната репетитивна ***DRC***-система за параметричните флуктуации ς на обекта (Фиг. 2г) в диапазони Табл. 2, Табл. 3 и d_i – Табл. 4.

Табл. 2

k_{1nom}	T_{1nom}	k_{2nom}	T_{2nom}	T_{3nom}
$k_1 = 3,85$	$T_1 = 1,91s$	$k_2 = 0,25$	$T_2 = 6,0s$	$T_2 = 1,5s$
$k_1\ var$	$T_1\ const$	$k_2\ var$	$T_2\ const$	$T_3\ const$
$3,58 \le k_1 \le 25$	$1,91\ s$	$0,25 \le k_2 \le 2,53$	$6\ s$	$1,5\ s$

Табл. 3

k_{1nom}	T_{1nom}	k_{2nom}	T_{2nom}	T_{3nom}
$k_1 = 3,85$	$T_1 = 1,91s$	$k_2 = 0,25$	$T_2 = 6,0s$	$T_2 = 1,5s$
$k_1\ var$	$T_1\ const$	$k_2\ var$	$T_2\ const$	$T_3\ const$
$3,58 \le k_1 \le 250$	$1,91\ s$	$0,25 \le k_2 \le 45,53$	$6\ s$	$1,5\ s$

Табл. 4

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
$\omega_{p1} = 0,50\ rad/s$	$\omega_{p2} = 1,00\ rad/s$	$\omega_{p3} = 2,09\ rad/s$	$\omega_{p4} = 3,00\ rad/s$	$\omega_{p5} = 4,59\ rad/s$	$\omega_{p6} = 6,00\ rad/s$
$\tau_{p1} = 12,56\ s$	$\tau_{p2} = 06,28\ s$	$\tau_{p3} = 03,00\ s$	$\tau_{p4} = 02,09\ s$	$\tau_{p5} = 01,36\ s$	$\tau_{p6} = 01,05\ s$

ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕПЕТИТИВНА $\mathcal{ML}$-*DRC*-СИСТЕМА

В работата се предлага проектирането **[11,12]** на репетитивната ***$\mathcal{ML}$-DRC***-система с $\boldsymbol{R}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$ (24) по структурата от Фиг. 5. Тя се отличава от ***DRC***-системата (Фиг. 4) по наличието на репетитивните филтри (Фиг. 5б) с памет $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) за всеки локален контур. Аналитичният синтез на $\mathcal{ML}_i$ се основава на (25) по метода на ***уравнението на лентовия филтър*** (27) и критерий ***режетиращ модул*** (28) **[11,12]**.

$$\boldsymbol{R}_{\mathcal{ML}\circ DRC}=\begin{bmatrix} \mathcal{ML}_i\cdot\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}\,1} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \mathcal{ML}_i\cdot\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}\,2} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \mathcal{ML}_i\cdot\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}\,3} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{ML}_i\cdot\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}\,4} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{ML}_i\cdot\mathcal{R}_{\mathcal{DRC}\,5}\end{bmatrix}, \tag{24}$$

$$\mathcal{ML}_i(p)=a_i\,(1+a_i)^{-1},\quad \left(a_i=\left(2-e^{-p\tau_i}\right)^{-1}\right), \tag{25}$$

$$\mathcal{ML}_{\mathcal{T}}(p)=\prod_{i=1}^{j}\mathcal{ML}_i(p)\ ;\quad d_{\Sigma}(t)=\sum_{i=1}^{j}\sin\omega_i t\ ,\ (j=6), \tag{26}$$

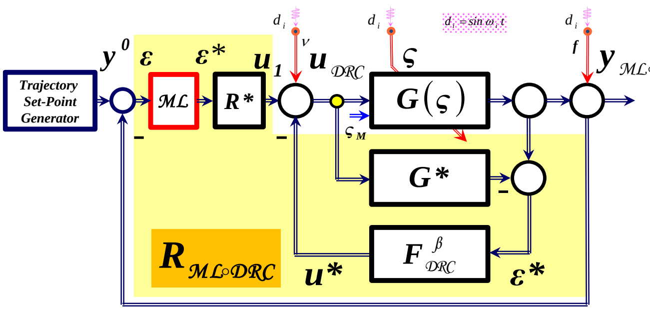
$$y_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(j\omega)\neq\varsigma\left(v(j\omega_p),f(j\omega_p)\right)\Leftrightarrow\left|\mathcal{ML}_i(j\omega_P)\right|_{\{\forall\omega\,\in\,\Delta\omega_i\,,\,(\omega_{b,i}<\,\omega_p<\,\omega_{h,i})\}}\xrightarrow{\quad}0\,, \tag{27}$$

$$\left|\mathcal{ML}_i(j\omega)\right|\equiv\begin{cases}0\,, & \forall\omega\in\Delta\omega_i\,,(\omega_{b,i}<\omega_p<\omega_{h,i})\\ 1\,, & \forall\omega\in[0,\omega_{b,i}],\forall\omega\in[\omega_{h,i},\infty),(\omega_{b,i}<\omega_p<\omega_{h,i})\end{cases}. \tag{28}$$

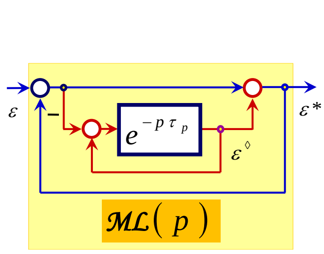
Табл. 5

$\mathcal{ML}_1$	$\mathcal{ML}_2$	$\mathcal{ML}_3$	$\mathcal{ML}_4$	$\mathcal{ML}_5$	$\mathcal{ML}_6$
$a_1=\left(2-\frac{p^2-0{,}40p+0{,}08}{p^2+0{,}40p+0{,}08}\right)^{-1}$	$a_2=\left(2-\frac{p^2-0{,}80p+0{,}30}{p^2+0{,}80p+0{,}30}\right)^{-1}$	$a_3=\left(2-\frac{p^2-1{,}67p+1{,}33}{p^2+1{,}67p+1{,}33}\right)^{-1}$	$a_4=\left(2-\frac{p^2-2{,}39p+2{,}75}{p^2+2{,}39p+2{,}75}\right)^{-1}$	$a_5=\left(2-\frac{p^2-3{,}68p+6{,}49}{p^2+3{,}68p+6{,}49}\right)^{-1}$	$a_1=\left(2-\frac{p^2-4{,}76p+10{,}88}{p^2+4{,}76p+10{,}88}\right)^{-1}$

Характеристиките на филтрите $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) са показани на Фиг. 6. В случай на адитивно въздействие d_{Σ} (26) на вибрациите d_i (Табл. 5), проектираната ***$\mathcal{ML}$-DRC***-структура използва мултипликативен филтър (Фиг. 6) с памет $\mathcal{ML}_{\mathcal{T}}$ (26).

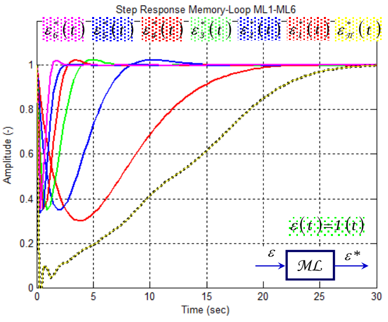


Фиг. 5а

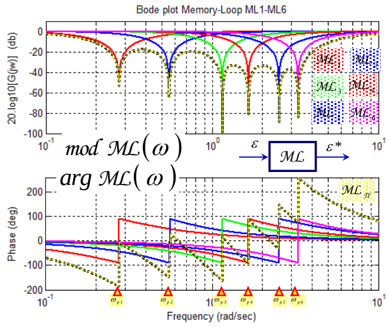


Фиг. 5б

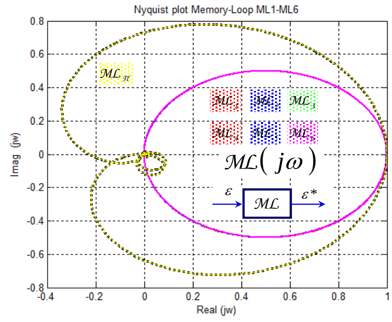
Фиг. 5в



Фиг. 6а

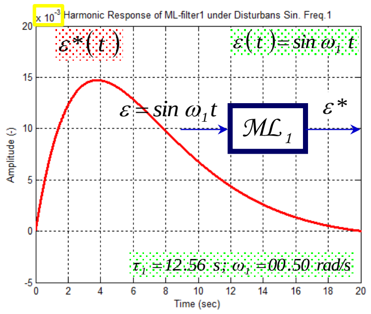


Фиг. 6б

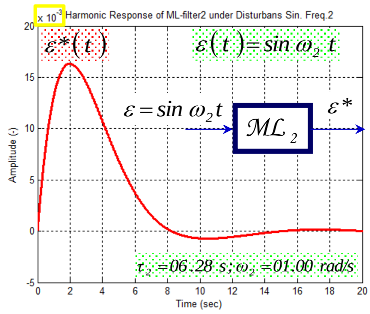


Фиг. 6в

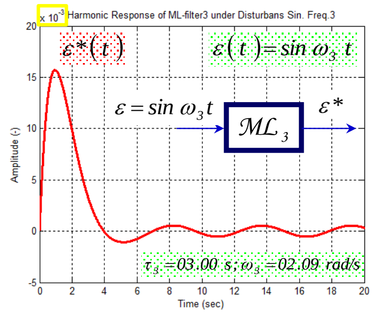
Ефективността на синтезираните репетитивни филтри $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) е изследвана чрез верификация на изпълнение на изискванията на критерия (28), предявен към техния синтез. Резултатите, илюстрирани с реакциите им на хармоничен входен сигнал на Фиг. 7, доказват че изискванията (28) към $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) са изпълнени с грешка $\varepsilon^* << \left| \pm 1{,}5.10^{-4}, \% \right|$, $(\varepsilon^* \rightarrow 0)$, стойността на която клони към нула. Характеристиките (Фиг. 8, Фиг. 9) на $\boldsymbol{R}_{PID}$-, $\boldsymbol{R}_{\mathcal{DRC}}$- и на $\boldsymbol{R}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$-алгоритмите за управление (9), (24), (12) са показани в сравнителен план.



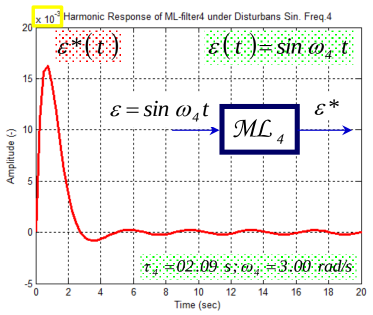
Фиг. 7а



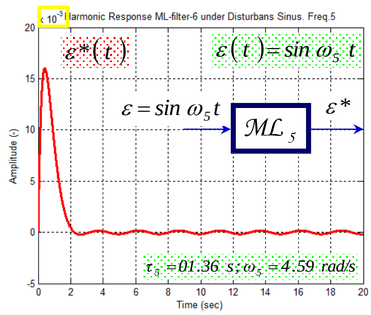
Фиг. 7б



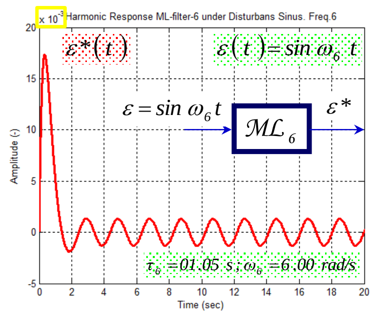
Фиг. 7в



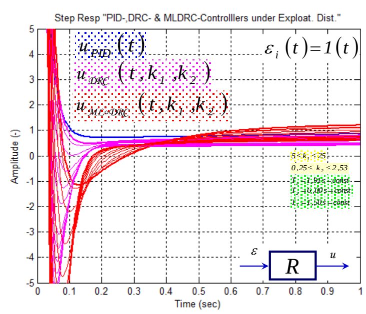
Фиг. 7г



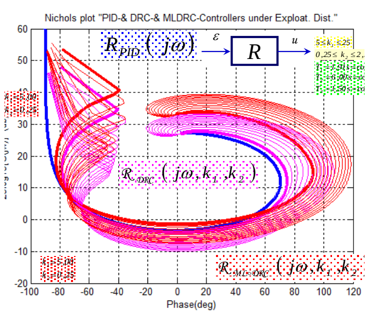
Фиг. 7д



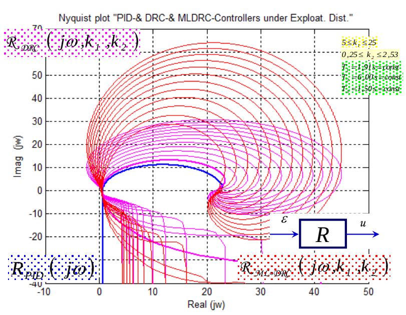
Фиг. 7е



Фиг. 8



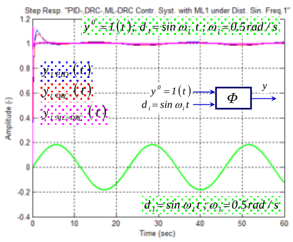
Фиг. 9а



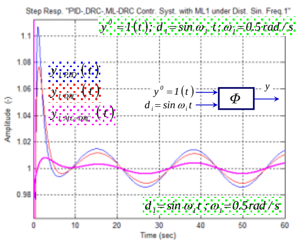
Фиг. 9б

Моделите (9)$\div$(25) на проектираните ***PID***-, ***DRC***- и ***$\mathcal{ML}$-DRC***-системи за управление (Фиг. 3, Фиг. 4, Фиг. 5) на манипулатора са симулирани. Характеристиките на затворените $\boldsymbol{\Phi}$ и на отворените $\boldsymbol{W}$ системи с $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) са илюстрирани на Фиг. 10$\div$Фиг. 15, а с $\mathcal{ML}_{\mathcal{T}}$ (26) – на Фиг. 16. Параметризираните характеристики (по Табл. 3) на ***DRC***- и ***$\mathcal{ML}$-DRC***-системите са представени на Фиг. 17. Очевидно ***$\mathcal{ML}$-DRC***-системата удовлетворява напълно (и по Табл. 2, и по Табл. 3, за $\mathcal{ML}_i$ и за $\mathcal{ML}_{\mathcal{T}}$) изискванията на:

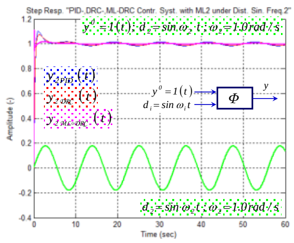
- локалния критерий за качество σ (10),(24) и запазване на бързодействието t_p (25), независимо от ς_M и ς, изразено сравнително на Фиг. 10$\div$ Фиг. 17 (Табл. 2, Табл. 3);
- критерия за ***минимално отклонение от номиналната траектория*** (19) изразен сравнително с $e_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$, $\boldsymbol{e}_{\mathcal{DRC}}$ и с e_{PID} (26) на Фиг. 9 (по Табл. 2), Фиг. 10 (по Табл. 3);



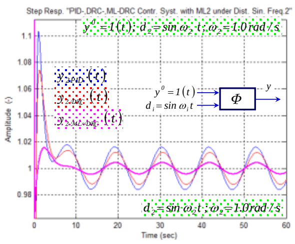
Фиг. 10а



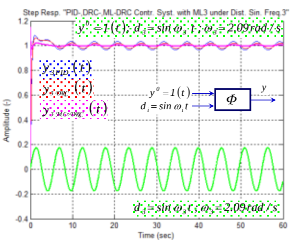
Фиг. 10б



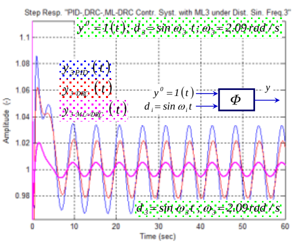
Фиг. 11а



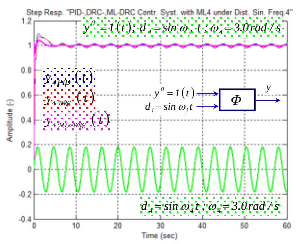
Фиг. 11б



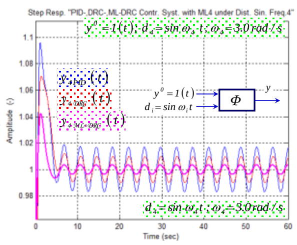
Фиг. 12а



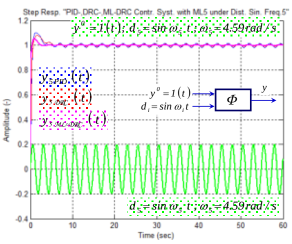
Фиг. 12б



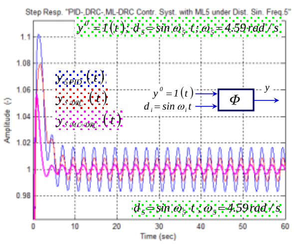
Фиг. 13а



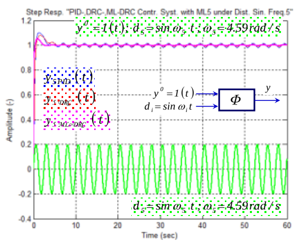
Фиг. 13б



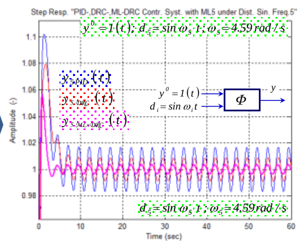
Фиг. 14а



Фиг. 14б



Фиг. 15а



Фиг. 15б

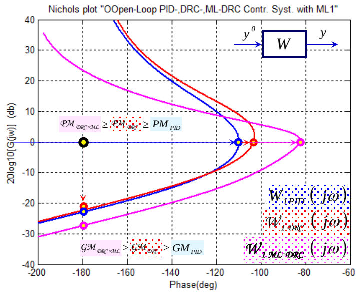
$$\sigma_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \cong \sigma_{\mathcal{DRC}} \cong \sigma_{PID} \cong \mathit{const} \;, \tag{24}$$

$$t_{p\ \mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \cong t_{p\ \mathcal{DRC}} \cong t_{p\ PID} \;, \tag{25}$$

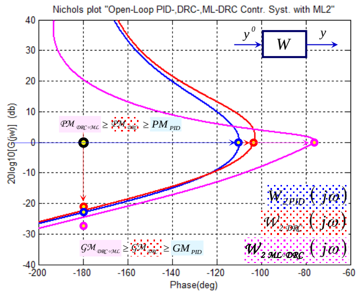
$$
\begin{gathered}
\left[e_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]=\left|\left[y_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]-\left[y_{nom}\right]\right|_{\left(G^{\Diamond}\in\Im\right)}\xrightarrow{}0\ ,\\
\left[e_{\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]=\left|\left[y_{\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]-\left[y_{nom}\right]\right|_{\left(G^{\Diamond}\in\Im\right)}\xrightarrow{}0\ ,\\
\left[e_{PID}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]=\left|\left[y_{PID}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]-\left[y_{nom}\right]\right|,\\
\left[e_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]<<\left[e_{\mathcal{DRC}}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right]<<\left[e_{PID}\left(\varsigma_M,\varsigma,d_i\right)\right],
\end{gathered}
\tag{26}
$$

- критерия за устойчивост (27), като запасите на устойчивостта по модул GM и по фаза PM са илюстрирани на Фиг. 10в ÷ Фиг. 17в, а съотношенията им са (27);

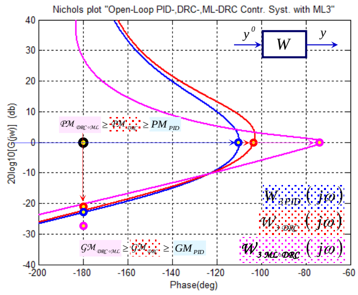
$$
\begin{gathered}
\mathcal{GM}^{\beta}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}>\mathcal{GM}^{\beta}_{\mathcal{DRC}}>GM_{PID}\ ;\ \mathcal{PM}^{\beta}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}>\mathcal{PM}^{\beta}_{\mathcal{DRC}}>PM_{PID}\ ,\\
\left(\forall\ G^{\Diamond}\left(p,\varsigma\right)\in\left[\ G^{*}(p),\ G^{\blacksquare}(p)\ \right]\ ,\ \forall\,\varsigma_M\in\left[\ 0,\ \varsigma_M^{\blacksquare}\ \right]\ \right),
\end{gathered}
\tag{27}
$$



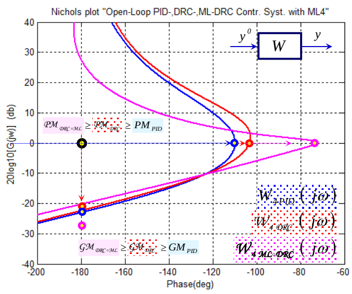
Фиг. 10в



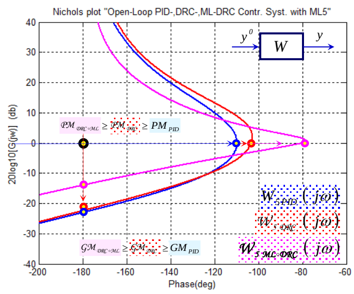
Фиг. 11в



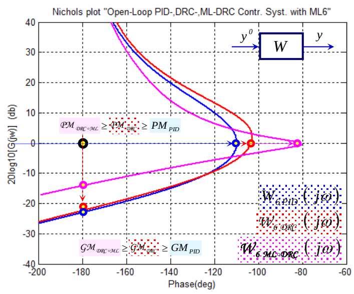
Фиг. 12в



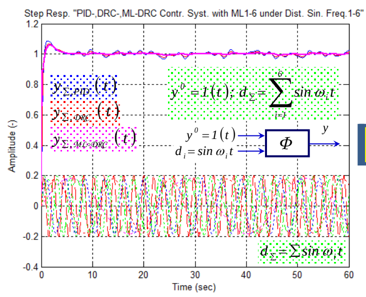
Фиг. 13в



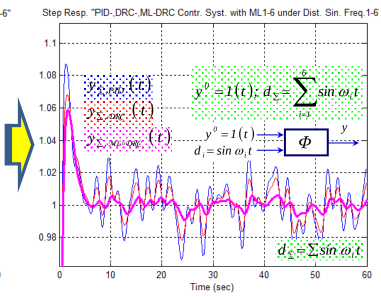
Фиг. 14в



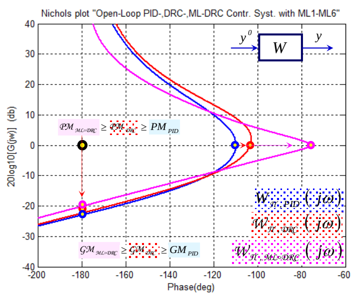
Фиг. 15в



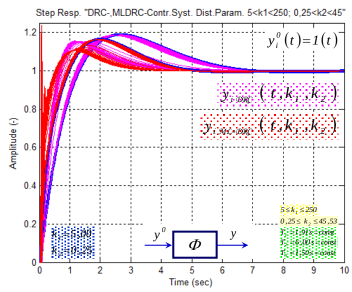
Фиг. 16а



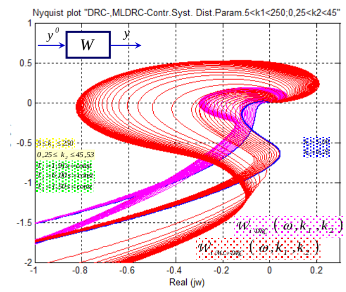
Фиг. 16б



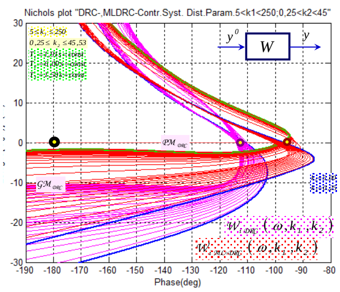
Фиг. 16в



Фиг. 17а



Фиг. 17б



Фиг. 17в

- изискванията за параметрическа инвариантност (28) на показателите на качеството на ***ML-DRC***-система от ς_M и d_i (Табл. 2, Табл. 3, Табл. 4). Очевидно е превъзходството на показателите на качество на ***ML-DRC***-системата пред ***PID***- и ***DRC***-системите, а (24)÷(28) аргументират нейната ефективност.

$$\begin{gathered}\sigma_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \neq f\left(\varsigma_M, d_i\right);\ t_{p\ \mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \neq f\left(\varsigma_M, d_i\right),\\ mod\,\boldsymbol{e}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \neq f\left(\varsigma_M, d_i\right), \left(\forall\omega\in[0,\omega_h]\right),\\ \mathcal{GM}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \neq f\left(\varsigma_M, d_i\right);\ \mathcal{PM}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} \neq f\left(\varsigma_M, d_i\right), \left(\forall\omega\in[0,\omega_h]\right).\end{gathered} \tag{28}$$

АНАЛИЗ НА ФИЛТРИРАЩИТЕ СВОЙСТВА НА *ML-DRC*-СИСТЕМАТА

Филтриращите свойства на ***ML-DRC***-системата към $d_i(\omega_{p\,i})$ (Табл. 5) са анализирани **[11]** по метода на алгебричната производна по направление $\boldsymbol{\alpha}^{(\omega_i)}_{i\,\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$ (29) на нейната характеристика на чувствителността $mod\,\boldsymbol{e}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$ (30), където $\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}$ е допълнителната чувствителност на системата. Характеристиките (30) на ***ML-DRC***-системата с $\mathcal{ML}_i$ (Табл. 5) са илюстрирани на Фиг. 18б÷Фиг.22б, а алгебричните производни (29) – на Фиг. 18в÷Фиг. 22в (в сравнителен план с тези на ***PID***- и ***DRC***-системите). Филтрирането на $d_i(\omega_{p\,i})$ е толкова по-ефективно, колкото по-силно е изпълнено изискването (31). Резултатите (Фиг. 18в÷Фиг. 22в), представени със съотношенията (32), еднозначно доказват възможностите на ***ML-DRC***-системата ефективно да компенсира отраженията на d_i върху показателите на качество.

$$\boldsymbol{\alpha}^{(\omega_i)}_{i\,\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega) = d\left|\boldsymbol{e}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega)\right| / d\omega\Big|_{\omega=\omega_{p\,i}}, \tag{29}$$

$$mod\,\boldsymbol{e}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega) = 1 - mod\,\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega) = \left|\left(1+\mathcal{R}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega)G^*(\omega)\right)^{-1}\right| \equiv \left|\Phi^{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}_{y^0\varepsilon}(\omega)\right|, \tag{30}$$

$$\boldsymbol{\alpha}^{(\omega_i)}_{i}(\omega) = d\left|\boldsymbol{e}_i(\omega)\right| / d\omega \underset{\{\omega=\omega_{p\,i}\}}{\rightarrow} 0, \tag{31}$$

$$\alpha^{(\omega_i)}_{i\,\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}} <<< \alpha^{(\omega_i)}_{i\,\mathcal{DRC}} < \alpha^{(\omega_i)}_{i\,PID},\ \left(\alpha^{(\omega_i)}_{i\,\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}(\omega) \underset{\{\omega=\omega_{p\,i}\}}{\rightarrow} 0\right). \tag{32}$$

РОБАСТЕН АНАЛИЗ НА РЕПЕТИТИВНА *ML-DRC*-СИСТЕМА

За сравнение на функционалните възможности на проектираните системи в нестационарен параметричен режим на априорна неопределеност, е проведен робастен анализ на качеството за флуктуации на управлявания обект в диапазоните, указани в Tabl.2 с аналитичния инструментариум **[11]** на:

- ***честотен Nyquist-анализ*** (Фиг. 23а) по характеристиките на номиналните W^* и на смутените на най-горна граница $W^{\blacksquare}$ (33) отворени системи на изискванията за робастни устойчивост RS_i (39) и качество RP_i

(40) в условията на априорна неопределеност, моделирана с кръгове $\pi\,(\,j\omega\,)$ (36) по окръжности $\pi^{0}\left(j\omega_{i}\right)$ (37) с радиуси $r^{0}\left(\omega_{i}\right)$ (38) и центрове в точките ω_{i} от ходографа W^{*}

- ***комбиниран честотен Nyquist-анализ*** (Фиг. 23б) по характеристиките на чувствителността η_i и на допълнителната чувствителност e_i на затворените системи, съобразно изпълнение на изискванията (39) и (40)**;**
- ***запаса на робастна устойчивост*** (Фиг. 23в) $k_{m\,sol}$ (41) и на ***запаса на робастно качество*** (Фиг. 30) $k_{m\,pol}$ (42)**.**

$$W_i^{*} = R_i\,G^{*}\ ;\qquad W_i^{\blacksquare} = R_i\,G^{\blacksquare}\,,\ \left|\,W_i^{*} - W_i^{\blacksquare}\right| = \varsigma\quad , \tag{33}$$

$$\left|\,1 + G^{*}\,(\,\omega\,)\,R_i\,(\,\omega\,)\right| \ >\ r^{0}(\,\omega\,)\ ,\ \forall\,\omega\ , \tag{34}$$

$$\left|\,1+G\,(\,\omega\,)\,R_i\,(\,\omega\,)\right|\ \geq\ \left|\,1+G^{*}\,(\,\omega\,)\,R_i\,(\,\omega\,)\right|\ -\ r^{0}(\,\omega\,),\ \forall\,G\in\Pi;\ \forall\,\omega\ ,$$

$$\pi\,(\,j\omega\,)\ \in\ \mathrm{W}\,(\,j\omega\,)\,,\,(\,\omega\in[\,0\,;\infty\,)\,)\ , \tag{36}$$

$$\pi^{0}\,\left(\,j\omega_{i}\,\right) = \begin{cases} \mathrm{Re}^{0}\,\left(\omega_{i}\right) = \mathrm{Re}^{*}\left(\omega_{i}\right) + r\,\left(\omega_{i}\right)\cos\,\Omega\ ,\ \ (\Omega\in[\,0\ ,\ \infty\,)) \\ \mathrm{Im}^{0}\,\left(\omega_{i}\right) = \mathrm{Im}^{*}\left(\omega_{i}\right) + r\,\left(\omega_{i}\right)\sin\,\Omega\ ,\ \ (\Omega\in[\,0\ ,\ \infty\,)) \end{cases}\ , \tag{37}$$

$$r^{0}\left(\omega_{i}\right) = \left|\ l_{a}\,\left(\omega_{i}\right)R_i\,\left(\omega_{i}\right)\right|\ =\ \left|\ l_{m}\left(\omega_{i}\right)R_i\,\left(\omega_{i}\right)G^{*}\left(\omega_{i}\right)\right|\ , \tag{38}$$

$$RS_{i}\ \ \Rightarrow\ \left|\,\eta_i\,(\,\omega\,)\ \bar{\ell}_m(\,\omega\,)\right|\ <\ 1\ ,\ \left(\forall\ \omega\ ,\ \omega\in[\,0,\ \infty\,)\,;\ \eta_i\ = R_i\,G^{*}\left(1+R_i\,G^{*}\right)^{-1}\right)\ , \tag{39}$$

$$RP_i\ \ \Rightarrow\ \left|\eta_i\,(\,\omega\,)\ \bar{\ell}_m\,(\,\omega\,)\right|\ +\ \left|e_i\,(\,\omega\,)\,v\,(\,\omega\,)\right|\ \ <\ \ 1\,,\ \left(\forall\ \omega\ ,\ \omega\in[\,0,\ \infty\,);\ \ e_i\ = \left(1+R_i\,G^{*}\right)^{-1}\right)\,, \tag{40}$$

$$k_{m\ sol\ i}\ \ (\ \omega\ ) = r^{0}(\,j\omega\,)\left|\,1+R_i\ \ (\,j\omega\,)\ \ G^{*}\,(\,j\omega\,)\right|^{-1}\ \leq\ 1\ ,\ \ (\forall\ \omega\ ,\ \omega\in[\,0,\ \infty\,))\ \ , \tag{41}$$

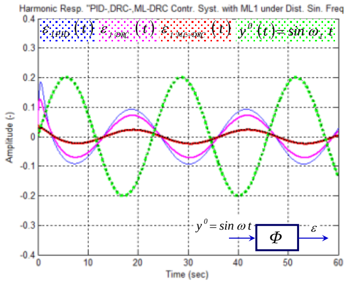
$$k_{m\ pol\ i}(\omega) = \left(\left|1+R_i\,(\,j\omega\,)\ G^{\star}\,(\,j\omega\,)\right| - \ r^{0}\,(\,j\omega\,)\right)\left|1+R_i\,(\,j\omega\,)\ G^{\blacksquare}(\,j\omega\,)\right|^{-1}\leq 1\ ,(\forall\ \omega\ ,\ \omega\in[\,0,\infty\,)). \tag{42}$$

$$RS_{\,PID}(\omega)<1;\ \mathcal{RS}^{3.105}_{\mathcal{DRC}}\,(\omega)<1;\ \mathcal{RS}^{3.105}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}\,(\omega)<1;\ \ \mathcal{RS}^{3.105}_{\mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}\,(\omega)>>\mathcal{RS}^{3.105}_{\mathcal{DRC}}\,(\omega)>>RS_{\,PID}(\omega)\,,\,(\,\forall\,\omega\,,\omega\in[\,0\,,\infty\,)), \tag{43}$$

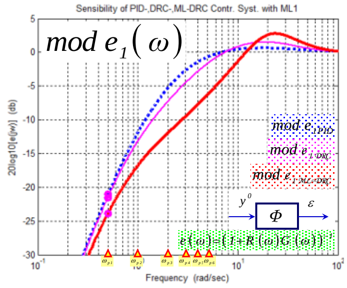
$$RP_{PID}(\omega)<1;\ \mathcal{RP}^{3.105}_{\mathcal{DRC}}\,(\omega)<1;\ \mathcal{RP}^{3.105}_{\mathcal{ML}\bullet\mathcal{DRC}}\,(\omega)<1;\ \ \mathcal{RP}^{3.105}_{\mathcal{ML}\bullet\mathcal{DRC}}\,(\omega)>>\mathcal{RP}^{3.105}_{\mathcal{DRC}}\,(\omega)>>RP_{PID}(\omega)\,,(\,\forall\,\omega\,,\omega\in[\,0\,,\infty\,))\,, \tag{44}$$

$$k^{\substack{3.105\\ \mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}}_{m\,sol}\,(\ \omega\ ) << k^{\substack{3.105\\ \mathcal{DRC}}}_{m\,sol}\,(\ \omega\ ) <<\ k^{PID}_{m\,sol}\,(\ \omega\ )\ ,\ \ (\,\forall\,\omega\,,\omega\in[\,0\,,\infty\,)\,)\,, \tag{45}$$

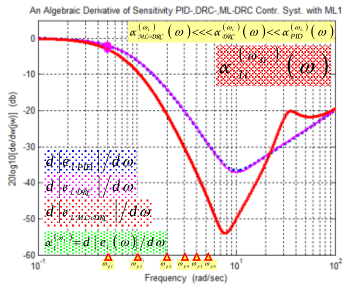
$$k^{\substack{3.105\\ \mathcal{ML}\circ\mathcal{DRC}}}_{m\,pol}\,(\ \omega\ ) << k^{\substack{3.105\\ \mathcal{DRC}}}_{m\,pol}\,(\ \omega\ ) <<\ k^{PID}_{m\,pol}\,(\ \omega\ )\ ,\ \ (\,\forall\,\omega\,,\omega\in[\,0\,,\infty\,)\,)\,. \tag{46}$$



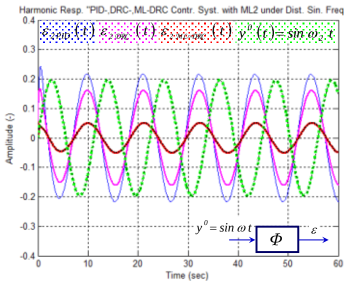
Фиг. 18а



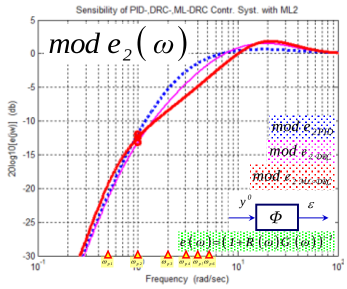
Фиг. 18б



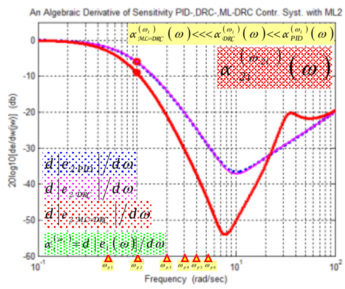
Фиг. 18в



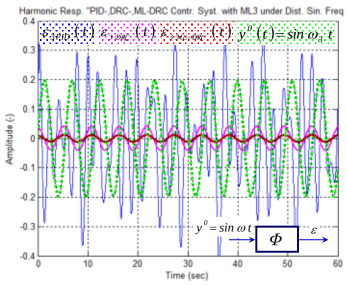
Фиг. 19а



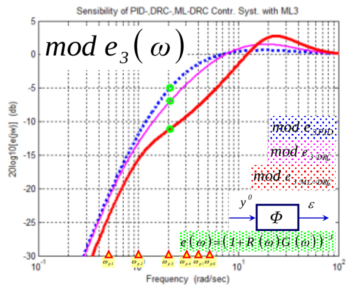
Фиг. 19б



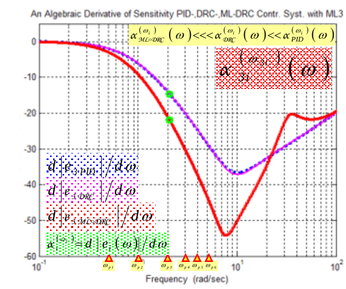
Фиг. 19в



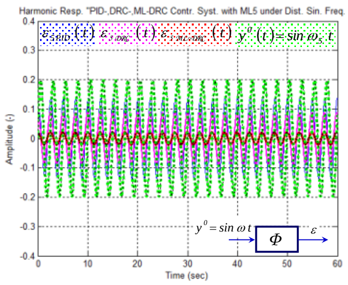
Фиг. 20а



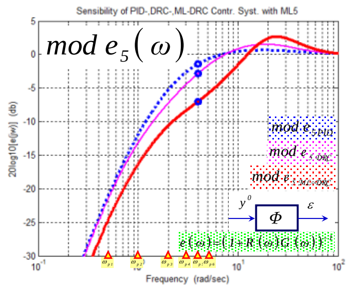
Фиг. 20б



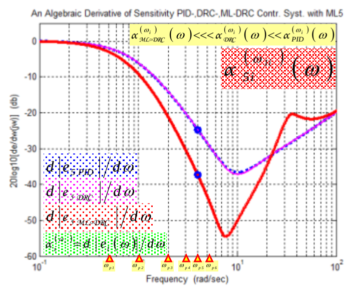
Фиг. 20в



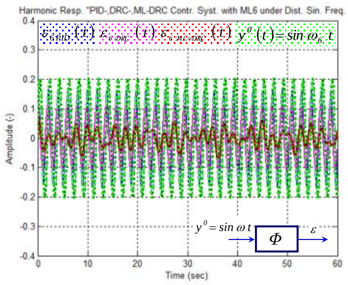
Фиг. 21а



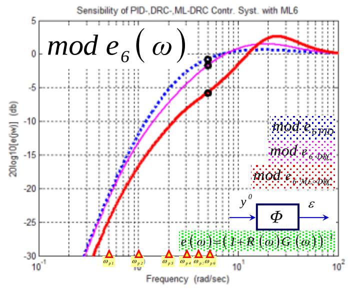
Фиг. 21б



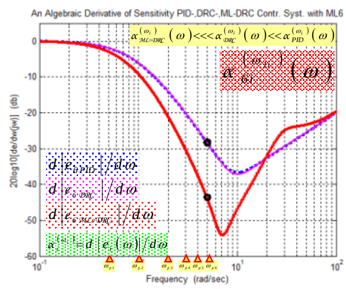
Фиг. 21в



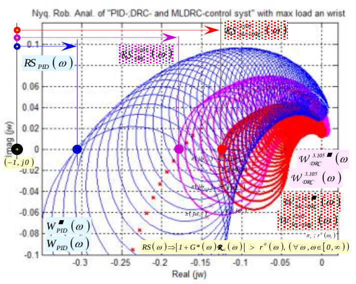
Фиг. 22а



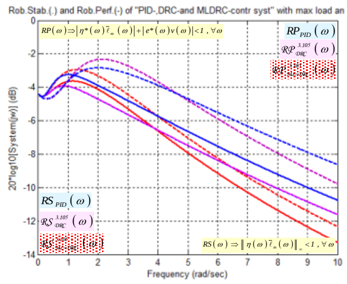
Фиг. 22б



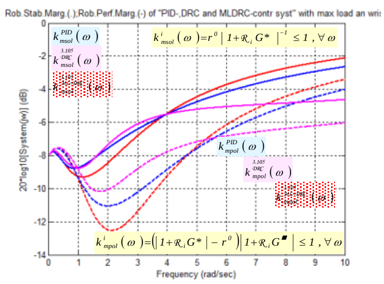
Фиг. 22в



Фиг. 23а



Фиг. 23б



Фиг. 23в

Резултатите (43) ÷ (46) от изследването (Фиг. 23) на ***PID***-, ***DRC***- и ***ML-DRC***-системите за управление (Фиг. 3, Фиг. 4, Фиг. 5) в условията на априорна неопределеност и нестационарен режим показват, че за диапазоните (Табл. 2) системите са с робастни устойчивост RS_i и качество RP_i еднозначно доказват превъзходството в показателите на качеството на ***ML-DRC***- системата пред тези на ***PID***- и ***DRC***-системите в нестационарен параметричен режим на априорна неопределеност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нови и оригинални в разработка са:

- Стратегията за репетитивно управление на робот-манипулатор с помощта на ***ML-DRC***-система, режектираща влиянието на параметрични/структурни смущения и механични вибрации върху регулируемата променлива;
- Резултатите от синтеза на ***ML-DRC***-система за управление на позицията на 5-DOF FANUC M-430iA/4FH ;
- Анализът на: изпълнение изискванията на критериите при синтеза; качеството; филтриращите свойства към механични вибрации и робастният анализ на проектираната ***ML-DRC***-система за управление на позицията на робота-манипулатор.

БЛАГОДАРНОСТИ

Извършените изследвания и получените резултати са във връзка с изпълнение на проект КП-06-Н37/17, финансиран от Фонд Научни Изследвания на МОН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cong Wang, Wenjie Chen, Masayoshi Tomizuka (2012), Robot End-effector Sensing with Position Sensitive Detector and Inertial Sensors, In Proc. of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation River Centre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18, 2012, 978-1-4673-1405-3/12/$31.00 ©2012 IEEE, 5252-5257
2. Masayoshi Tomizuka (2013), Control Methodologies for Manufacturing Applications, Manufacturing Letters, © 2013 Elsevier, 1 (2013), 46-48
3. Shouren Huang, Niklas Bergström, Yuji Yamakawa, Taku Senoo, Masatoshi Ishikawa (2016), High-Performance Robotic Contour Tracking Based on the Dynamic Compensation Concept, In Proc. of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), © 2016 IEEE, Electronic ISBN: 978-1-4673-8026-3, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487577, 3886-3893
4. Xu Chen, Atsushi Oshima, Masayoshi Tomizuka (2013), Inverse-Based Local Loop Shaping and IIR-Filter Design for Precision Motion Control, In Proc. of 6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems The International Federation of Automatic Control, April 10-12, 2013. Hangzhou, China, © 2013 Elsevier, 978-3-902823-31-1/13/$20.00 © 2013 IFAC, 10.3182/20130410-3-CN-2034.00066, 490-497

5. Xu Chen, Masayoshi Tomizuka (2012), A Minimum Parameter Adaptive Approach for Rejecting Multiple Narrow-Band Disturbances with Application to Hard Disk Drives, IEEE Transactions on Control System Technology, © 2012 IEEE, 20(2), doi:10.1109/TCST.2011.2178025, 408-415

6. Youngwoo Lee, Liting Sun, Jun Moon, Chung Choo Chung, Masayoshi Tomizuka (2019), Reference Modulation for Performance Enhancement of Motion Control Systems with Nonlinear Parameter Variations, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, July 2019, DOI: 10.1109/TMECH.2019.2930087, pp.1-8

7. E. Nikolov (2019), DRC-Systems - Invers Solutions with Fractional Clegg-Operators - part 1, part 2, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 69, Issue 3, 2019, © 2019 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 47-66

8. E. Nikolov, N.G. Nikolova, M. Georgiev (2020), Description and modelling of robot-manipulator FANUC M-430iA/4FH, In the 9-th International Scientific Conference “Engineering, Technologies and Systems”, Technical University-Sofia Plovdiv Branch, 14-16 May, Plovdiv, Bulgaria

9. E. Nikolov, V. Karlova-Sergieva, B. Grasiani (2020), Design control system of robot-manipulator FANUC M-430iA/4FH, In the 9-th International Scientific Conference “Engineering, Technologies and Systems”, Technical University-Sofia Plovdiv Branch, 14-16 May, Plovdiv, Bulgaria

10. E. Nikolov, N.G. Nikolova (2020), Performance Analysis and Robust Analysis of the DRC-System of Robot-Manipulator FANUC M-430IA/4FH, In Proc. of IEEE International Conference Automatics and Informatics’2020 (ICAI’20), 1-3 October 2020, Varna, Bulgaria

11. Nikolova N.G., E. Nikolov (2014), Predictive-Repetitive Control (Applied Methods for Process Control -part III), © 2014 Publishing House of Technical University of Sofia, ISBN 978-619-167-136-6, 158 p.

12. Nikolova N.G., E. Nikolov (2013), Absorptive Repetitive Filters with Operators of Generalized Fractional Calculus, Journal Cybernetics and Information Technologies, 2013, Volume 12, No X, ISSN 1311–9702, © 2013 Bulgarian Academy of Sciences, pp. 21-32

Автори: *Емил Николов*, проф. дтн инж., Технически университет-София,
факултет Автоматика, катедра Автоматизация на непрекъснатите производства,
e-mail: nicoloff@tu-sofia.bg

Нина Николова, доц. д-р инж., Технически университет-София,
факултет Автоматика, катедра Автоматизация на непрекъснатите производства,
e-mail: ninan@tu-sofia.bg

Authors: *Prof. D.Sc. Emil Nikolov*, Technical University of Sofia,
Faculty of Automatics, department Industrial automation,
e-mail: nicoloff@tu-sofia.bg

Assoc. prof. Dr. Nina Nikolova, Technical University of Sofia,
Faculty of Automatics, department Industrial automation,
e-mail: ninan@tu-sofia.bg