

На рис. 1 існують: U_0 – сигнал управління системи привода; SR, CR1 і CR2 – цифрові регулятори швидкості і статорних токів двигателів; FC1 і FC2 – частотні перетворювачі; AM1 і AM2 – трьохфазні асинхронні електродвигатели; ZOH – екстраполятор нульового рівня; ADC – аналого-дискретний перетворювач сигналів; SS – датчик (сенсор) швидкості привода; SC1 і SC2 – сенсори статорних токів двигателів; T_0 – період дискретності управління.

1. Структурна схема електропривода

С метою вивчення динамічних характеристик розглядаваної системи електропривода і для побудови його структурної схеми використаємо наступні рівняння руху двигателів в відносних приращеннях змінних:

$$K_{AM,i} \Delta f^* - \frac{\Delta v_i}{\delta_{B,i}} - \Delta \mu_{Ei} = T_i \frac{d(\Delta v_i)}{dt}, \quad i = 1; 2 \quad (1),$$

де $\Delta f^* = \frac{\Delta f}{f_B}$, $\Delta \mu_{Ei} = \frac{\Delta M_{E,i}}{M_{ST,iB}}$, $\Delta v_i = \frac{\Delta \omega_i}{\omega_B}$ – відносні приращення змінних відповідно: частоти напруги живлення двигателів, пружних моментів механічних валів і кутових швидкостей двигателів;

$K_{AM,i} = (1 + \delta_{B,i}) / \delta_{B,i}$ – коефіцієнти передач двигателів; $\delta_{B,i} = \Delta \omega_{B,i} / \omega_B$ – відносні падіння швидкостей двигателів; $\Delta \omega_{B,i} = M_{ST,B,i} \cdot r_{2,i} / c_{AM,i}^2$; $c_{AM,i} = U_{NOM} / \omega_{0,NOM}$; $c_{AM,i} = U_{NOM} / \omega_{0,NOM}$; $T_i = J_i \omega_B / M_{ST,B,i}$ – механічні постійні часи двигателів.

В умовах, коли $U / f = const$, справедливо $\Delta f^* = \Delta v$, де $\Delta v = \frac{\Delta U}{U_B}$ – відносне приращення статорної напруги. Тоді (1) для першого двигателю можна представити так:

$$K_{AM,1} \cdot \Delta v_1 - \frac{\Delta v_1}{\delta_{B,1}} - \Delta \mu_{E,1} = T_1 \cdot \frac{d(\Delta v_1)}{dt} \quad (2)$$

Аналогічно (2) можна написати рівняння руху і для другого двигателю:

$$K_{AM,2} \cdot \Delta v - \frac{\Delta v_2}{\delta_{B,2}} - \Delta \mu_{E,2} = T_2 \frac{d(\Delta v_2)}{dt} \quad (3)$$

Рівняння руху самого механізму (преса буммашини) буде мати вигляд

$$\sum_{i=1}^2 K_{Li} \Delta \mu_{Ei} - \Delta \mu_{ST} = T_M \cdot \frac{d\Delta v_M}{dt} \quad (4)$$

де $K_{Li} = \frac{M_{ST1}}{M_{ST}}$, $K_{L1} = \frac{M_{ST1}}{M_{ST}}$ – коефіцієнти

навантажень двигателів; $T_M = J_M \omega_B / M_{ST}$ – механічна постійна часу механізму;

Якщо врахувати електромагнітні перехідні процеси в силових електричних частинах систем (FC1-AM1 і FC2-AM2) одними еквівалентними електромагнітними постійними часами $T_{E,i} = (\omega_0 \cdot s_{k,i})^{-1}$, $i = 1; 2$, а також постійними часами систем управління FC1 і FC2 ($T_{FC,i}$, $i = 1; 2$), то система диференціальних рівнянь всієї силової електромеханічної частини привода в відносних приращеннях змінних примет вигляд

$$\begin{cases} \Delta \mu_i - \Delta \mu_{Ei} \frac{d(\Delta v_i)}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot \frac{d(\Delta v_i)}{dt}, \Delta \mu_i = K_{AM,i} \Delta v_i - \frac{\Delta v_i}{\delta_{B,i}}; \\ \sum_{i=1}^2 K_{Li} \Delta \mu_{Ei} - \Delta \mu_{ST} = \frac{1}{T_M} \cdot \frac{d(\Delta v_M)}{dt}; \\ \Delta \mu_{Ei} = \frac{1}{T_{ci}} \cdot \int (\Delta v_i - \Delta v_M) dt + \frac{T_{di}}{T_{ci}} \cdot (\Delta v_i - \Delta v_M); \\ T_{Ei} \frac{d\Delta \mu_i'}{dt} + \Delta \mu_i' = K_{AM,i} \cdot \Delta v_i; \\ T_{FC,i} \frac{d\Delta v_i}{dt} + \Delta v_i = K_{FC,i} \cdot \Delta v_{CR,i}, i = 1; 2, \end{cases} \quad (5)$$

де $\Delta \mu_i'$, Δv_M , Δv_{CR} – відносні приращення моменту двигателю, кулової швидкості механізму і напруги на виході регулятора струму (CR); $T_M = J_M \omega_B / M_{ST}$ – механічна постійна часу механізму; T_{di} і T_{ci} – постійні часи, що характеризують пружність і в'язкість механічної передачі [3]; $K_{FC,i} = K'_{FC,i} \cdot \alpha_{FC}$, $i = 1; 2$ – коефіцієнти передач частотних перетворювачів при записі рівнянь з змінними в відносних приращеннях; $K'_{FC,i} = \Delta E_{FC,B,i} / \Delta U_{CR,B,i}$ – коефіцієнти передач частотних перетворювачів; $\alpha_{FC} = U_{0,B} / E_{FC,B}$ – узгоджуючий коефіцієнт при вказаній записі рівнянь.

Перехід на операторну форму запису в системі рівнянь (5) можна побудувати деталізовану структурну схему привода, рис. 2. На схемі існують: динамічні коефіцієнти посилення регуляторів

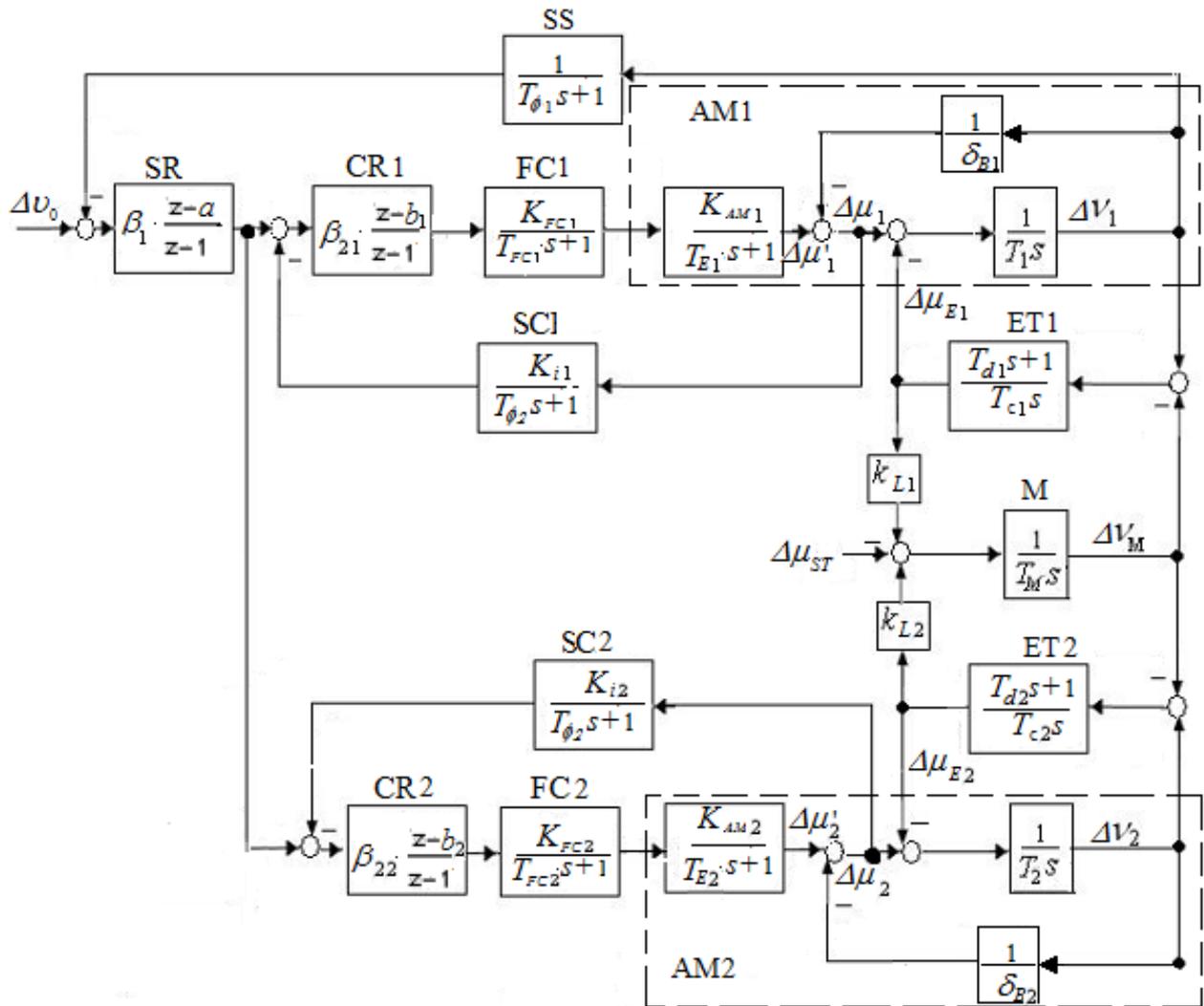


Рис. 2. Структурна схема двухдвигательного асинхронного электропривода

β_1 и β_{21} , β_{22} и постоянные (a и b_1, b_2), зависящие от величин T_{E1}, T_1, T_2, T_M и $T_0; T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – постоянные времени фильтров после датчиков токов и скорости; $K_{i1,2} = K_i' \cdot \alpha_i$ – коэффициенты передачи датчиков токов; $K_i' = U_{SC.B} / I_{AM.B}$; $\alpha_i = I_{AM.B} / U_{0.B}$.

В этой схеме передаточные функции цифровых регуляторов (типа ПИ) изображены с дискретными z -операторами, где $z = 1 + T_0 \cdot s$, $s = d/dt$ – оператор Лапласа.

2. Оптимизация регуляторов и результаты моделирования системы привода

Для получения передаточных функций механической части привода от сигнала $\Delta\mu_1$ к

сигналу ΔV_1 , а также от сигнала $\Delta\mu_2$ к сигналу ΔV_1 , запишем (2) – (4) в форме удобном для метода пространства состояний

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu; \\ y = Cx, \end{cases} \quad (6)$$

где: u – входные сигналы объекта, т. е. $\Delta\mu_1$ и $\Delta\mu_2$; y – выходной сигнал системы, т. е. ΔV_1 ; $x^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ – вектор пространства состояний переменных, в частности: угловые скорости двигателей ($x_1 = \Delta V_1$, $x_2 = \Delta V_2$), ($x_3 = \Delta V_M$) механизма и упругих моментов соединительных валов ($x_4 = \Delta\mu_{E1}$, $x_5 = \Delta\mu_{E2}$).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{L1}}{T_M} & \frac{K_{L2}}{T_M} \\ \frac{1}{T_{c1}} & 0 & -\frac{1}{T_{c1}} & -\frac{T_{d1}}{T_{c1}} \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \frac{K_{L1}}{T_M}\right) & -\frac{T_{d1}}{T_{c1}} \cdot \frac{K_{L2}}{T_M} \\ 0 & \frac{1}{T_{c2}} & -\frac{1}{T_{c2}} & -\frac{T_{d2}}{T_{c2}} \cdot \frac{K_{L1}}{T_M} & -\frac{T_{d2}}{T_{c2}} \cdot \left(\frac{1}{T_2} + \frac{K_{L2}}{T_M}\right) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для привода с 300 и 200 кВт асинхронными двигателями значения его параметров составляют: 1) $\delta_{B1} = 0,087$; $K_{AM1} = 8,5$; $T_1 = 1,5$ с;

$T_{d1} = 2 \cdot 10^{-3}$ с; $T_{c1} = 4 \cdot 10^{-4}$ с; $K_{L1} = 0,6$;

2) $\delta_{B2} = 0,085$; $K_{AM2} = 7$; $T_2 = 1,2$ с;

$T_{d2} = 2 \cdot 10^{-3}$ с; $T_{c2} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ с; $T_M = 10$ с. Тогда матрицы A и B примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.667 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.83 \\ 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.04 \\ 2500 & 0 & -2500 & -3.6 & -0.2 \\ 0 & 2857 & -2857 & -0.348 & -5 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0.667 \\ 0.83 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из системы (5) получим общую формулу для определения передаточных функций:

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sE - A)^{-1} \cdot B, \quad (9)$$

где E – единичная матрица размером 5×5 .

Подставляя A и B из (7) в (8) получим передаточную функцию объекта системы:

$$W_{OB}(s) = \frac{\Delta V_1(s)}{\Delta \mu_1(s)} + \frac{\Delta V_1(s)}{\Delta \mu_2(s)} = \frac{0,33 \cdot s^4 + 2,87 \cdot s^3 + 885 \cdot s^2 + 3369 \cdot s + 200000}{0,5 \cdot s^5 + 4,3 \cdot s^4 + 2161 \cdot s^3 + 8983 \cdot s^2 + 2,25 \cdot 10^6 \cdot s} \quad (10)$$

На рис. 3 представлены логарифмические амплитудная L_{OB} и фазовая φ_{OB} частотные характеристики, соответствующие (9). Амплитудная характеристика L_{OB} на частоте $\omega_{E1} = 1/\sqrt{T_1 \cdot T_{c1}} = 44, s^{-1}$ имеет резонансный пик, обычно мешающий достичь в динамике

максимального быстродействия и процессов без значительных упругих колебаний.

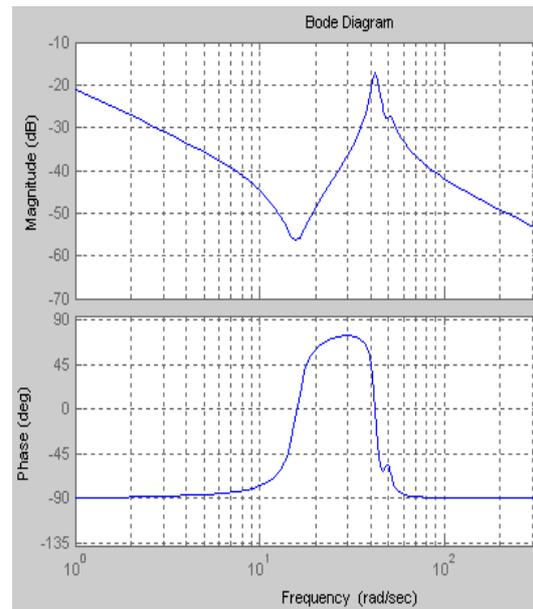


Рис. 3. ЛАЧХ объекта L_{OB} и φ_{OB} двухдвигательного асинхронного электропривода

Для исследования динамических режимов рассматриваемой системы (рис. 2) на компьютере была собрана схема, представленная на рис. 4. Кроме выше приведённых параметров были определены числовые значения и других величин схемы: $T_{E1} = 0,1$ с; $T_{\phi 1} = 0,002$ с; $K_{FC1} = 10$ с; $T_{FC2} = 0,01$ с; $T_{\phi 2} = 0,02$ с; $T_{E2} = 0,07$ с; $K_{FC2} = 10$; $T_{FC2} = 0,01$ с; $T_M = 10$ с.

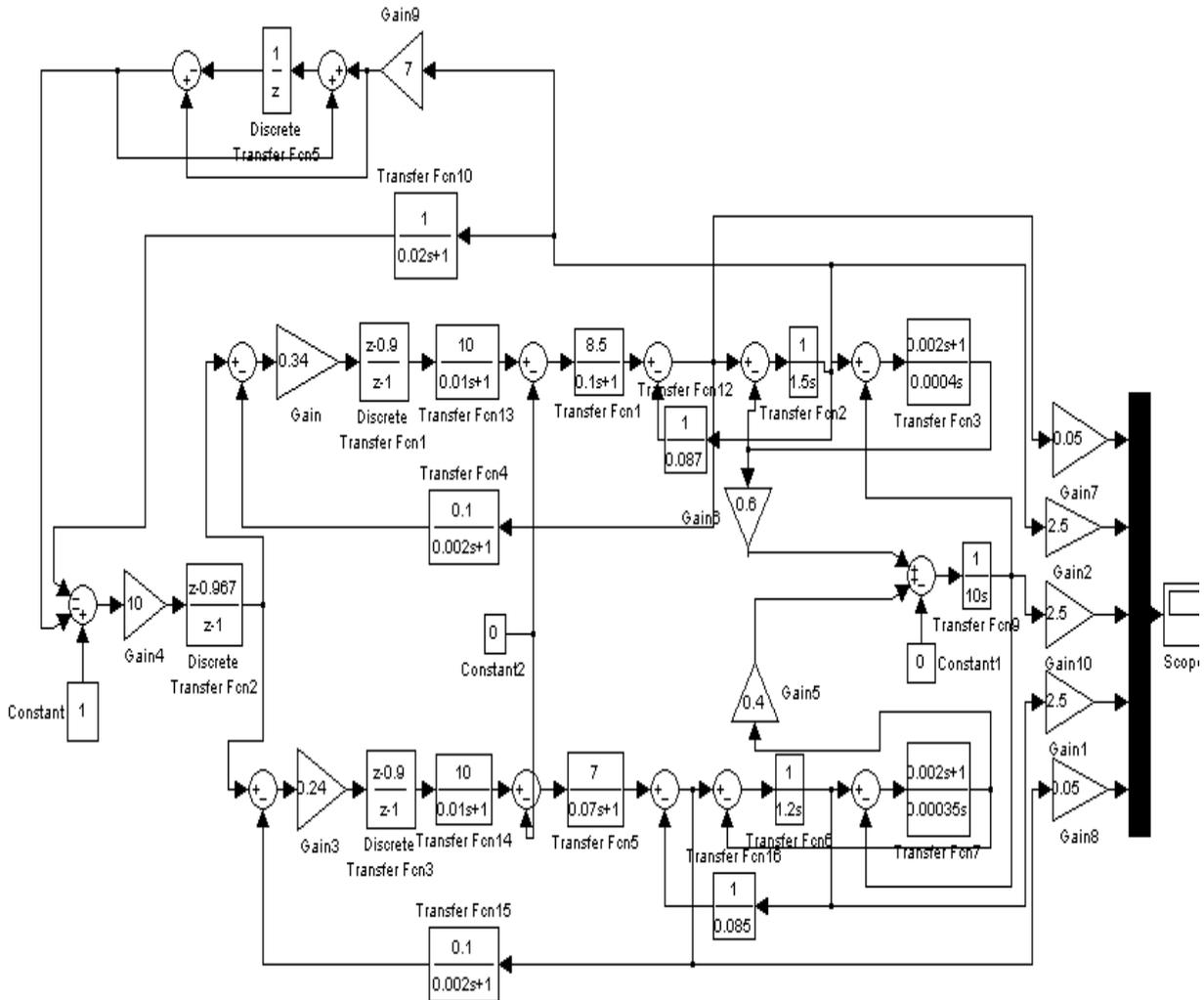


Рис. 4. Компьютерная структурная схема двухдвигательного асинхронного электропривода с цифровыми регуляторами с учетом упругих свойств механических передач

В процессе моделирования системы (рис. 4) было установлено, что влияние на динамику внутренних обратных связей двигателей через коэффициенты $1/0.087$ и $1/0.085$ в контурах токов ($\Delta i_i = \Delta \mu_i, i = 1, 2$) со стороны скоростей двигателей (Δv_1 или Δv_2) являются незначительными. Поэтому настройку регуляторов токов (CR1 и CR2) можно выполнить согласно т. н. „модульного оптимума“ [2; 3]. В данном случае параметры CR1 были определены по следующим формулам:

$$\beta_{21} = \frac{T_{E1}}{2 \cdot k_{i1} \cdot k_{FC1} \cdot k_{AM1} \cdot T_{\Sigma 2}}; \quad \tau_{21} = T_{E1}, \quad (11)$$

где $T_{\Sigma 2} = T_{FC1} + T_{\phi 2} = 0,012$ с; $\beta_{21} = 0,34$;

$\tau_{21} = 0,1$ с. При цифровом исполнении регулятора „CR1” его передаточную функцию необходимо представить с „z” дискретными операторами ($z = 1 + T_0 \cdot s$, [6, 7]), т. е. в следующем виде:

$$W_{CR1}(z) = \beta_{21} \cdot \frac{z - b_1}{z - 1} = 0,34 \cdot \frac{z - 0,9}{z - 1}. \quad (12)$$

Аналогічно CR1 найдём параметри и CR2:

$$\beta_{22} = 0,24; b_2 = 0,9. \quad (13)$$

Настройку регулятора скорости (SR) можно выполнить согласно „симметричному оптимуму”, в данном случае по следующим формулам:

$$\beta_1 = \frac{k_{il} \cdot (T_1 + T_2)}{3,5 \cdot T_{\Sigma 1}}; \quad \tau_1 = 10 \cdot T_{\Sigma 1}, \quad (14)$$

где $T_{\Sigma 1} = T_{\phi 1} + T_{\Sigma 2} = 0,02 + 0,012 = 0,032$ с.

В результате вычислений получим: $\beta_1 = 10$; $\tau_1 = 0,3$ с. При цифровом исполнении регулятора „SR” его передаточная функция примет вид

$$W_{SR}(z) = \beta_1 \cdot \frac{z - a}{z - 1} = 10 \cdot \frac{z - 0,967}{z - 1}. \quad (15)$$

Исследования динамики на компьютере показали, что без введения гибкой обратной связи по скорости двигателя на вход SR переходные процессы были недопустимо сильно колеблющимися (рис. 5).

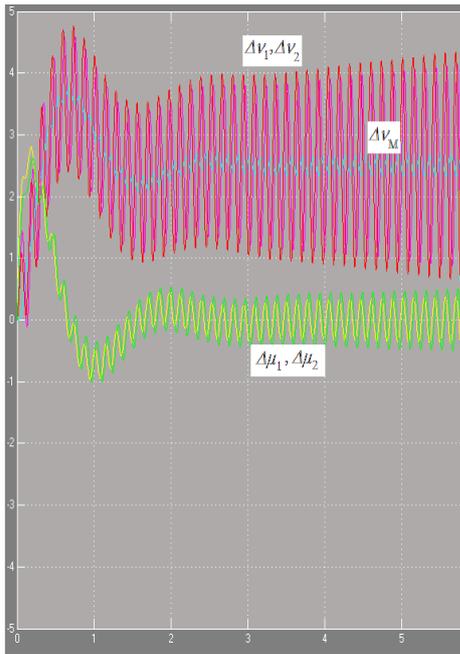


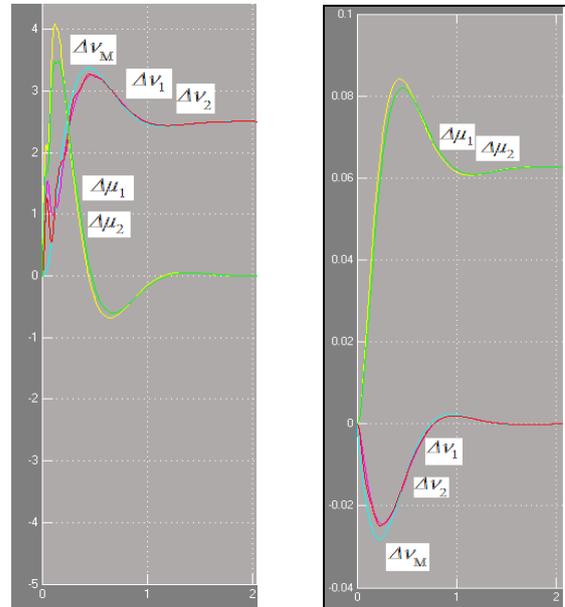
Рис. 5. Кривые переходных процессов при управляющем воздействии, но без коррекции (ГОС)

После введения на вход SR ГОС с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{0,035 \cdot s}{0,005 \cdot s + 1} \Rightarrow W(z) = \frac{7(z - 1)}{z + 1} \quad (16)$$

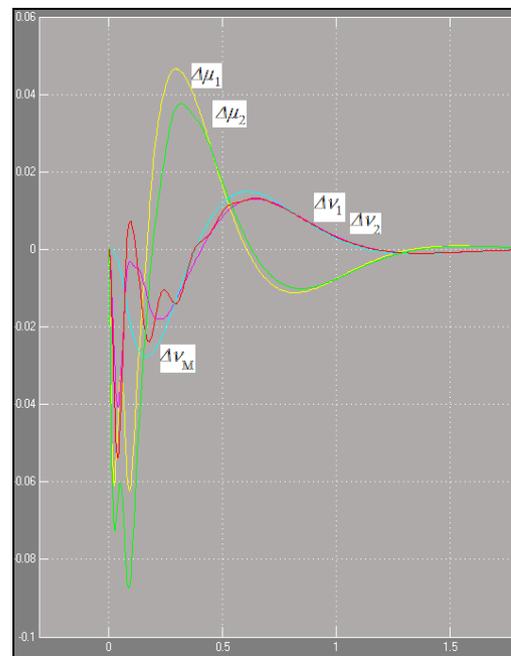
динамические характеристики привода значительно улучшились как при подаче управля-

ющего сигнала ΔU_0 (рис. 6, а), так и при набросе нагрузки $\Delta \mu_{ST}$ (рис. 6, б) и ступенчатом изменении напряжения сети ΔU_S (рис. 6, в). Кроме того, данная система управления обеспечивает точное распределение нагрузки между двигателями, так как в режиме нагрузки $\Delta \mu_1 = \Delta \mu_2$ (рис. 6, б).



а)

б)



в)

Рис. 6. Кривые переходных процессов с коррекцией при управляющем воздействии (а), при нагрузке (б) и при ступенчатом изменении напряжения сети (в)

3. Выводы

Для современных прессов бумагоделательных машин разработана упрощенная трёх-контурная цифровая система управления двух-двигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с одним регулятором скорости и индивидуальными регуляторами статорных токов двигателей.

Составлена математическая модель динамики системы электропривода. В результате частотного анализа объекта системы привода выведены формулы для определения оптимальных параметров цифровых регуляторов и коррекции (ГОС). Моделированием динамических режимов привода на компьютере получены переходные характеристики системы почти такими же качественными показателями, какие имеет тиристорный электропривод постоянного тока при наличии упругих звеньев ([1], [3], [8]).

Предложенная схема управления двух-двигательного частотного электропривода является конкурентоспособной и по динамическим показателям, и по точности распределения нагрузки между двигателями.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии им. Ш. Руставели (грант № FR/7/3-160/14).

Список использованной литературы

1. Барышников, В. Д. Динамика секционных тиристорных электроприводов бумагоделательных машин [текст] / В. Д. Барышников, Ю. А. Борцов [и др.] // ж. „Электричество”, – Москва, 1973.– № 1.– с. 43–48.
2. Raatz, E. Regelung von antrieben mit Elastischer verbindung zur arbeitsmaschinen [text] / E. Raatz // ENZ, 1981, A92, N 4, s. 211–216
3. Дочвири, Дж. Н. Оптимизация переходных процессов многодвигательных тиристорных электроприводов для прессовых механизмов непрерывных технологических машин [текст] / Дж. Н. Дочвири // ж. „Электричество”, Москва, 2006.– № 2.– с. 34–42.
4. Соколовский, Г. Г. Возможности упрощения математического описания асинхронного двигателя при построении системы регулирования скорости [текст] / Г. Г. Соколовский [и др.] // „изв. ЛЭТИ”, сер. „Электротехника”, С.– Петербург, 2002.– №1.– с. 3–7.
5. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного

тока с вентильными преобразователями [текст] / О. В. Слежановский [и др.] // Москва, Энергоатомиздат – 1983. – 256 с.

6. Ogata, K. Discrete-Time Control Systems [text] / Upper Saddle River, N.J.: Prentice hall, 1994.
7. Antoniou, A. Digital Filters: Analysis, Design, and Applications [text] / McGraw-Hill, NY, 1993.
8. Dochviri, J., Khachapuridze, O., Beradze, N. A Digital Filter for Electrical Drive with Elastic Shaft [text] / American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2015, v. 3, № 5, pp. 112–116.

References

1. Baryshnikov, V. D., Bortsov, Y. A. (1973), et al. Dynamics of Thyristor Electrical Drives of the Sections of Paper Machines, [Dinamika sekcionnyh tiristornyh jelektroprivodov bumagodelatel'nyh mashin], J. Russian Electrical Technology. vol.1, pp. 43–48.
2. Raatz, E. Regelung von antrieben mit Elastischer verbindung zur arbeitsmaschinen (1981)// ENZ, A92, N 4, s. 211–216
3. Dochviri, J. N. (2006), The Optimization of Transients in Multimotor Thyristor Electric drives with Elastic Links for The Press Mechanisms of Continuous Technological Machines [Optimizacija perehodnyh processov mnogodvigatel'nyh tiristornyh jelektroprivodov dlja pressovyh mehanizmov nepreryvnyh tehnologicheskikh mashin], J. Russian Electrical Technology. v. 2, vpp. 34–42.
4. Sokolovskii, G. G., (2002) et. al. Possibility of Simplification of the Mathematical Model of AC Drive by Construction of a Speed Control System [Vozmozhnosti uproshhenija matematicheskogo opisaniya asinhronnogo dvigatelja pri postrenii sistemy regulirovanija skorosti], J. „LETI”-s. „Electrical Technology”, Saint-Petersburg, №1, pp. 3-7.
5. Slezhanovskii, O.V., (1983), et. al. The Systems of Slave Control of the AC Drives with Valve Converters [Sistemy podchinennogo regulirovanija jelektroprivodov peremennogo toka s ventil'nyimi preobrazovateljami], Moscow, EAI, 256 p.
6. Ogata, K. Discrete-Time Control Systems. Upper Saddle River, N.J.: Prentice hall, 1994.
7. A. Antoniou (1993), Digital Filters: Analysis, Design, and Applications/ McGraw-Hill, NY.
8. Dochviri, J., Khachapuridze, O., Beradze, N. A Digital Filter for Electrical Drive with Elastic Shaft [text] / American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2015, v. 3, № 5, pp. 112–116.

TWO-MOTOR AC ELECTRICAL DRIVE WITH A SIMPLIFIED CONTROL SYSTEM FOR PRESSES OF PAPER MACHINES

J. N. Dochviri

Georgian Technical University

Abstract. *In the paper dynamics of simplified control system of two-motor electrical AC drive with frequency regulation its speed is investigated. Mathematical model of the drive is constructed via electromagnetic processes agreement by taking into account elasticity of transmissions. The formulas to determine the optimal parameters of digital regulators for stator currents of the motors and speed of the drive are given. Simulation results obtained in the Matlab are presented. It is established that considered system of the drive guarantees optimal dynamic characters as well as exact distribution of loading between the motors.*

Key words: *two-motor AC electrical drive, digital control, digital control, optimization of dynamics, proportional distribution of loading.*

ДВОДВИГУНОВИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З СПРОЩЕНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ПРЕСІВ ПАПЕРОМАШИН

Дж. Н. Дочвірі

Грузинський технічний університет

Анотація. *В роботі досліджена динаміка спрощеної системи управління двохдвигунного асинхронного електроприводу з частотним регулюванням швидкості. Створено математичну модель приводу шляхом еквівалентування електромагнітних процесів двигунів та обліку пружних властивостей механічних передач. Визначено формули для розрахунку оптимальних параметрів цифрових регуляторів статорних струмів двигунів і швидкості приводу. Наведено результати дослідження перехідних процесів, отримані на комп'ютері в програмі MATLAB. Показано, що розглянута система приводу забезпечує як оптимальні динамічні характеристики, так і точний розподіл навантаження між двигунами.*

Ключові слова: *дводвигуновий частотний електропривод, цифрове управління, оптимізація динаміки, розподіл навантаження.*

Получено 25.09.2016



Дочвіри Джумбер Николаевич, доктор технических наук, профессор, департамента електроенергетики Грузинського технічного університета. Ул. Костава, 77, Тбілісі, Грузія, E-mail: Jumber_Dochviri@yahoo.com, тел. +995-579-44-19-01

Jumber Dochviri, Dr. of Science, Professor of the Department of electrical engineering, Georgian Technical University, Kostava str., 77, Tbilisi, Georgia

ORCID ORG:0000-0003-1138-8963