

УДК 621.313

Дочвири Дж. Н., д-р техн. наук

## ДИНАМИКА ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВОЗБУЖДЕНИЙ ПРИ ЦИФРОВОМ УПРАВЛЕНИИ

**Аннотация.** В работе рассмотрена оптимизация динамических характеристик системы двухдвигательного электропривода с регулированием возбуждений двигателей при цифровом управлении. Рассмотренная система управления обеспечивает пропорциональное распределение нагрузки между двигателями. Приведены математическая модель привода и скорректированные оптимумы для определения параметров цифровых регуляторов системы. Даны результаты исследования переходных процессов, полученные на компьютере в программе MATLAB.

**Ключевые слова:** двухдвигательный электропривод, цифровое управление, автоматическое распределение нагрузки, оптимизация динамики.

Dochviri J. N., DSci.

## DYNAMICS OF TWO-MOTOR ELECTRIC DRIVE WITH REGULATION OF EXCITEMENT UNDER DIGITAL CONTROL

**Abstract.** The paper deals with the optimization of dynamic characteristics of two-motor electric drive via the regulation of excitations by digital control. Considered system guarantees proportional distribution of loading between the motors. A mathematical model of the drive and method for determining the optimal parameters of the digital controllers are given. The results of the study of transients of the drive system are simulated via the MATLAB source.

**Keywords:** two-motor electrical drive, digital control, proportional load distribution, dynamic

### 1. Введение

Система управления электропривода с изменением возбуждений двигателей обеспечивает более плавный и большой диапазон регулирования скорости, что так важно для металлургических и бумагоделательных машин [1], [2]. Вместе с тем известно, что в настоящее время на указанных машинах широко внедряются цифровые регуляторы [3]. Однако, выбор параметров цифровых регуляторов не всегда возможно определять с помощью стандартных оптимумов [4]. Поэтому ниже на базе частотных характеристик разработаны скорректированные оптимумы для цифровых регуляторов.

На рис.1 представлена структурная схема рассматриваемой системы двухдвигательного электропривода с цифровыми регуляторами типа ПИ соответственно: скорости (SR), токов якорей (CAR1 и CAR2) и токов возбуждений (CER1 и CER2) двигателей; SCA1, SCA2, SCE1 и SCE2 – датчики токов якорей и возбуждений; TE1 и TE2-тиристорные возбудители; SS-датчик скорости от главного двигателя.

### 2. Структурная схема электропривода

Структурная схема рассматриваемой системы привода (рис.1) построена с помощью следующих дифференциальных уравнений, записанных для силовой электромеханической части привода в операторной форме ( $s=d/dt$ )

$$\begin{cases} \Delta U_C = k_{e,q} (\Delta v + \Delta \varphi_q) + \frac{1}{k_{a,q}} \cdot (1 + T_{a,q} \cdot s) \cdot \Delta I_{a,q}; \\ \Delta I_{e,q} = \frac{k_{e,q}}{T_{e,q} \cdot s + 1} \cdot \Delta U_{e,q}; \\ \Delta \varphi_q = k_{\varphi,q} \cdot \Delta I_{e,q}; \\ \sum_{q=1}^2 k_{L,q} (\Delta \varphi_q + \Delta I_{a,q}) - \Delta \mu_{ST} = T_M \cdot s \cdot \Delta v, \quad q = 1; 2 \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\Delta U_C, \Delta v, \Delta \varphi_q, \Delta I_{a,q}, \Delta I_{e,q}$  - относительные приращения соответственно якорного напряжения, угловой скорости привода, потока возбуждения и токов якорей и возбуждений двигателей;

$$k_{e,q} = \frac{1}{1 + \delta_{q,NOM}}; k_{a,q} = 1 + \frac{1}{\delta_{q,NOM}}; k_{\varphi,q} = \frac{1 + \delta_{q,NOM}}{\delta_{q,NOM}};$$

$$\delta_{q.NOM} = \frac{R_{a,q} \cdot I_{a,q.NOM}}{k_q \cdot \Phi_{q.NOM} \cdot \omega_{NOM}}; \Delta\omega_{q.NOM} \text{ – падение}$$

скорости двигателей при номинальной нагрузке;

$$k_{\Phi,q} = k_{e,q} \cdot \frac{I_{e,q}}{\Phi_q}; k_{\phi,q}; T_{a,q} = \frac{L_{a,q}}{R_{a,q}};$$

$$T_{e,q} = \frac{L_{e,q}}{R_{e,q}} = \frac{W_{e,q} \cdot \Phi_{q.NOM}}{R_{e,q} \cdot i_{e,q.NOM}} \text{ – электромагнитные}$$

постоянные времени якорных цепей и цепей возбуждения;  $k_{L,q} = M_{ST,q} / M_{ST.NOM}$  – коэффициенты распределения нагрузки между двигателями;  $T_M = J_\Sigma \cdot \omega_{NOM} / M_{ST.NOM}$  – механическая постоянная времени привода;  $\Phi_q$  – магнитный поток двигателей;  $\omega$  – угловая скорость привода;  $I_{a,q}$  – ток якорей двигателей;  $u_{e,q}$  – напряжение возбуждения;  $r_{e,q}$  и  $L_{e,q}$  – активное сопротивление и индуктивность цепей возбуждения;  $i_{e,q}$  – ток возбуждения двигателей;  $M_{ST}$  – статический момент сопротивления механизма;  $J_\Sigma$  – момент инерции привода.

При составлении схемы на рис.1 также были использованы известные передаточные функции цифровых регуляторов и датчиков.

На схеме (рис.1) имеются:  $\beta_1, \beta_2, \beta_2', \beta_3, \beta_3', a, b$  и  $c$  – динамические коэффициенты усиления регуляторов (SR, CAR1, CAR2, CER1 и CER2) и постоянные времени, зависящие от величин  $T_a, T_e$  и  $T_0$ ;  $T_{\Sigma 3}$  – малая постоянная времени внутреннего контура;  $T_{\phi 2}$  – постоянная времени фильтра датчика тока якоря;  $T_0$  – период дискретности цифровых регуляторов;  $\Delta\mu_1, \Delta\mu_2$  – вращающие моменты двигателей.

### 3. Оптимизация регуляторов и результаты моделирования системы привода

Параметры регуляторов внутренних контуров CER1 и CER2 определим согласно т.н. «модульного оптимума» [1] и [5]:

$$\beta_{3q} = \frac{T_{eq}}{2 \cdot k_{Tq} \cdot k_{ieq} \cdot T_{\Sigma 3q}}; c = 1 - T_0 / T_{eq}, q = (1; 2),$$

где  $k_{Tq}, k_{ie,q}$  – коэффициенты усиления тиристорного возбудителя и датчика тока возбуждения;  $T_{\Sigma 3}$  – малая постоянная внутреннего контура,  $T_{\Sigma 3} = T_{\phi 3} + T_T = 0.012c$ ;  $T_0 = 0.01c$  – период дискретизации цифрового регулятора.

Передаточная функция внутреннего контура системы будет иметь вид:

$$W_{3q}(s) = \frac{1}{k_{ie,q}(T_{\Sigma 3}s + 1)} = \frac{1}{0.95(0.012s + 1)}. \quad (2)$$

С учётом (2) передаточная функция объекта контура якорного тока (относительно главного двигателя) будет равна:

$$W_{OB2}(s) = \frac{k_{\phi 1} \cdot k_{e1} \cdot k_{a1} \cdot k_{ia1}(T_{\phi 3}s + 1)}{k_{ie1}(T_{\Sigma 3}s + 1)(T_{a1}s + 1)(T_{\phi 2}s + 1)} \approx \frac{18.7}{(12 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 0.112 \cdot s + 1)}, \quad (3)$$

Если в (3) произведём замену аналогового оператора (s) дискретным оператором (z) согласно формулы [3]:

$$s = (z - 1) / T_0, z = e^{T_0 s} \approx 1 + T_0 \cdot s, T_0 = 0.01c.$$

получим:

$$W_{OB2}(z) = \frac{0.58z + 0.4257}{z^2 - 1.332z + 0.3932}. \quad (4)$$

На базе диаграмм Бode (рис.2), построенных согласно (4), оптимальные параметры регуляторов CAR1, CAR2 были найдены с помощью следующих «скорректированных оптимумов»:

$$\beta_{2q} = \frac{T_{aq} \cdot k_{ieq}}{4 \cdot k_{\phi q} \cdot k_{eq} \cdot k_{aq} \cdot k_{iaq} \cdot T_{\Sigma 2}}; \tau_{2q} = T_{aq}, q = 1; 2 \quad (5)$$

где  $k_{ia1}$  – коэффициент усиления датчика тока якоря,

$$k_{ia1} = 0.1; T_{\Sigma 2} = T_{\Sigma 3} + T_{\phi 2}; k_{ie1} = 0.1; k_{\phi 1} = 0.9; k_{e1} = 0.95; k_{a1} = 0.1; T_{a1} = 0.1c; T_{\phi 2} = 0.002c.$$

Используя (5) дискретная передаточная функция регулятора тока якоря CAR1 будет иметь вид:

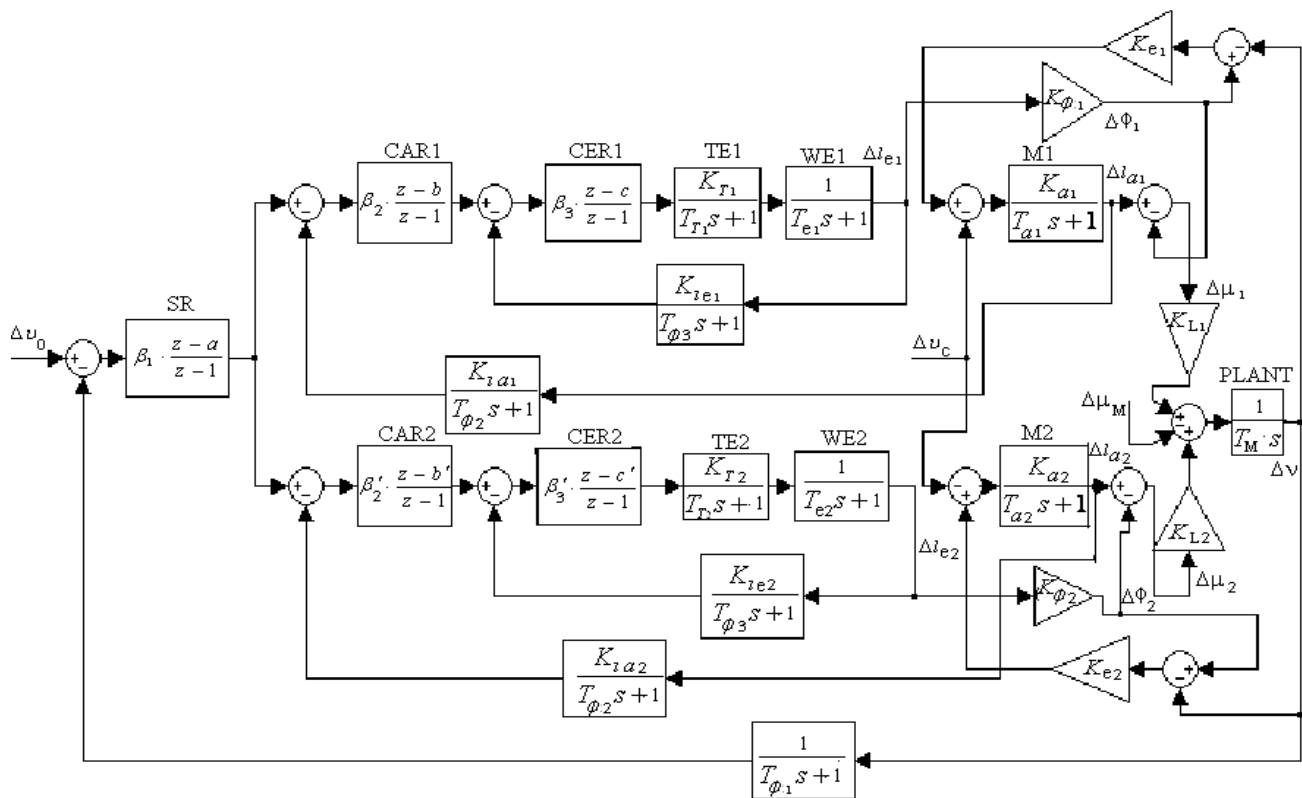


Рис.1. Структурная схема системы управления двухдвигательным электроприводом с одним SR и индивидуальными регуляторами токов якорей и токов возбуждений двигателей.

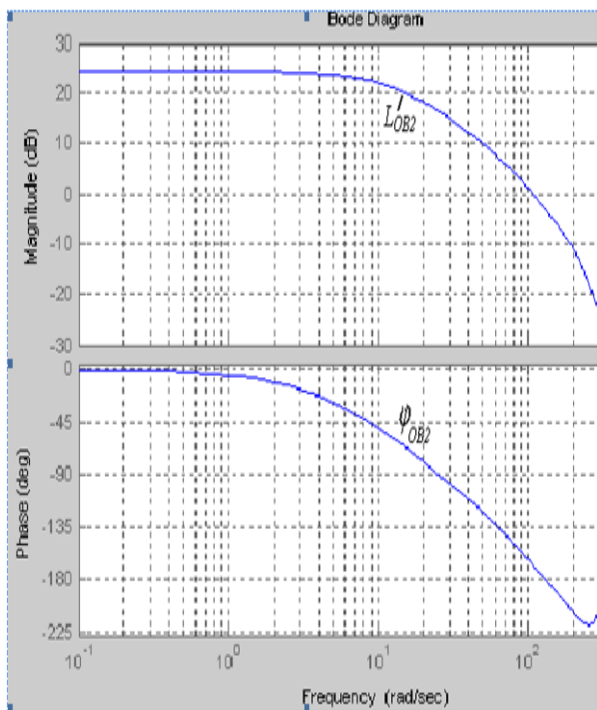


Рис.2. Диаграммы Бode объекта контура

якорного тока (главного двигателя).

$$W_{CAR1}(z) = \frac{0.1(z - 0.9)}{z - 1} \quad (6)$$

С учётом (6) напишем дискретную передаточную функцию разомкнутого контура якорного тока:

$$W_{Open2}(z) = W_{OB2}(z) \cdot W_{CAR1}(z) = \frac{0.058z^2 - 0.01z - 0.038}{z^3 - 2.33z^2 + 1.725z - 0.3932} \quad (7)$$

Соответствующие (7) диаграммы Бode приведены на рис. 3

Согласно рис.3 для определения оптимальных параметров цифрового регулятора скорости SR также понадобилась корректировка известного «симметричного оптимума» [6] следующим образом:

$$\beta_1 = \beta_{s.o.} / 2 = k_{ia} \cdot T_M / 4.3 \cdot T_{\Sigma 1};$$

$$\tau_1 = \tau_{s.o.} / 2 = 8.6 \cdot T_{\Sigma 1}, \quad (8)$$

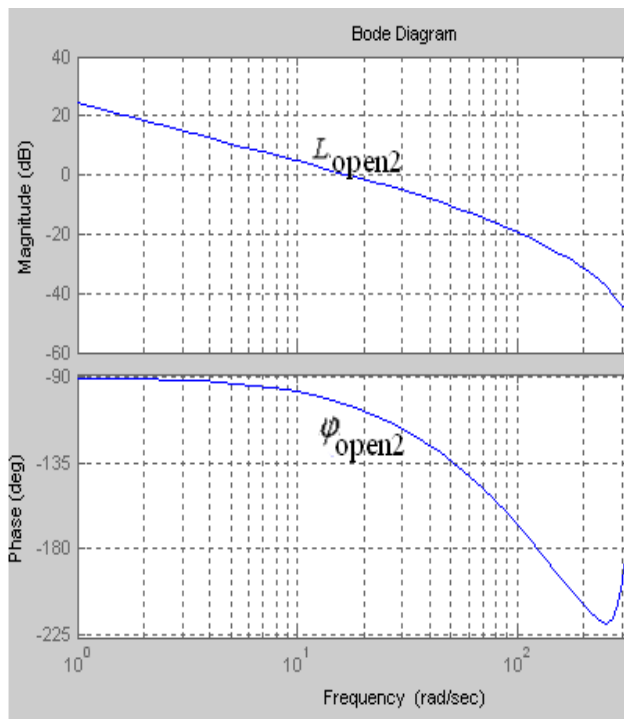


Рис.3. Диаграммы Боде разомкнутого контура якорного тока (главного двигателя)

где:  $T_{\Sigma 1} = T_{\phi 1} + 2 \cdot T_{\Sigma 2} = 0.005 + 2 \cdot 0.012 = 0.029 \text{ с}$ ;  $T_M = 10 \text{ с}$ ;  $k_{ia} = 0.1$ .

Тогда, при  $T_0 = 0.01 \text{ с}$ , получим-  
 $\beta_1 = 8$ ;  $\tau_1 = 0.25 \text{ с}$ .

Передаточная функция регулятора скорости SR в дискретном виде с учётом (8) будет:

$$W_{SR}(z) = \frac{8 \cdot (z - 0.96)}{z - 1}. \quad (9)$$

В результате моделирования рассматриваемой системы двухдвигательного электропривода с цифровым управлением динамические характеристики близки к оптимизированным как при подаче ступенчатого сигнала на вход системы (рис.4, а), а также при набросе нагрузки со стороны механизма (рис.4,б). Одинаковые изменения (в относительных единицах) моментов двигателей ( $\Delta \mu_1$  и  $\Delta \mu_2$ ) подтверждают, что

предложенная система управления двухдвигательным электроприводом с одним регулятором скорости и при цифровом управлении с высокой точностью обеспечивает пропорциональное распределение нагрузки между двигателями.

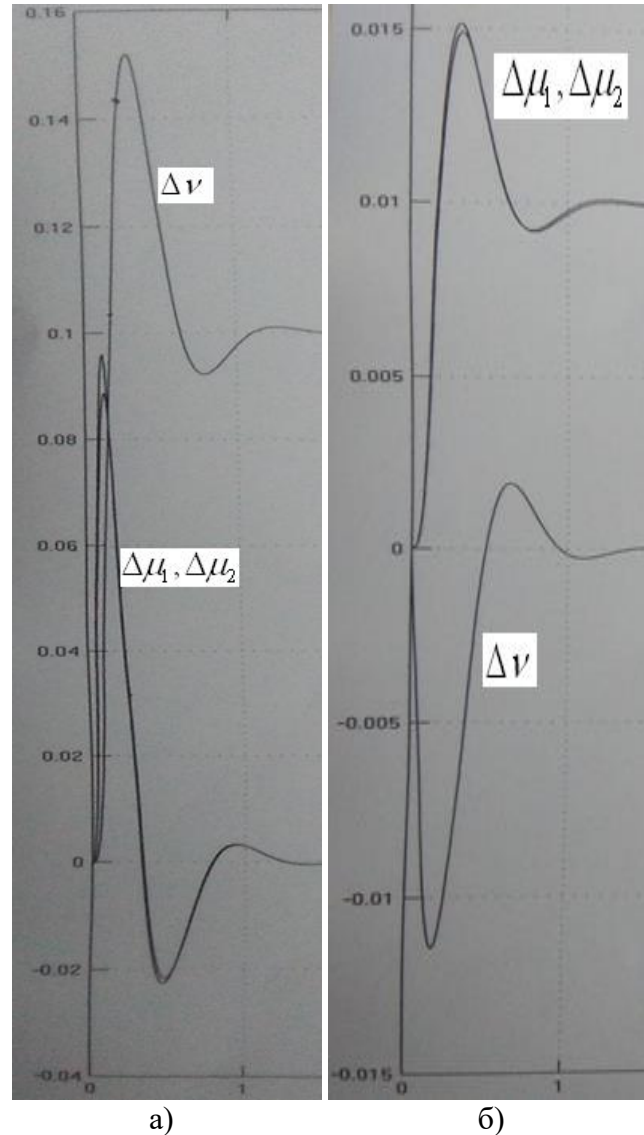


Рис. 4. Кривые переходных процессов скорости привода и моментов двигателей при ступенчатом воздействии на систему: а) по управлению ( $\Delta v_0 = 0.01$ ); б) по нагрузке ( $\Delta \mu_m = 0.1$ ).

#### 4. Выводы

Для современных прессов бумагоделательных машин построена трёхконтурная цифровая система управления двухдвигатель-

ным электроприводом с одним регулятором скорости и индивидуальными регуляторами якорных токов и токов возбуждений двигателей.

Составлена математическая модель системы электропривода и в результате частотного анализа выведены скорректированные выражения для определения оптимальных параметров цифровых регуляторов. Моделированием динамических режимов привода на компьютере получены переходные характеристики системы, близкие к оптимизированным.

Предложенная схема управления двухдвигательного электропривода является конкурентоспособной с точки зрения распределения нагрузки между двигателями, что обеспечивается более точными простым методом.

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

#### Список использованной литературы

1. Leonhard W. Control of electrical drives. Berlin: Springer, 2001.
2. Дочвири Дж. Н. Динамика систем управления тиристорных электроприводов с регулированием возбуждения электродвигателя / Дж. Н. Дочвири, И. Дж. Дочвири, Н. Дж. Берадзе. //Технічна Електродінаміка–К.: – 2005. – №6. – С. 30 – 35.
3. Ogata K. Discrete-time control systems. Upper Saddle River, N.J.: Prentice hall, 1994.
4. Барышников В.Д., Борцов Ю.А. и др. Динамика секционных тиристорных электроприводов бумагоделательных машин /В.Д. Барышников, Ю.А. Борцов и др. //Электричество. – М.: – 1973. № 1,с. 43 –48.
5. Дочвири Дж. Н. Оптимизация переходных

процессов многодвигательных тиристорных электроприводов для прессовых механизмов непрерывных технологических машин / Дж. Н. Дочвири// Электричество. – М.: – 2006. № 2, с. 34 –42.

6. Kessler C., (1958), Das Symmetrische Optimum, *Regelungstechnik*, Vol. 6, pp. 395 – 400.

Получено 24.03.2016

#### References

1. Leonhard W. Control of electrical drives. Berlin: Springer, 2001
2. Dochviri J., etc. Dynamics of control systems of thyristor electric drives with an electric Motor excitation control. *J. Technical Electrodynamics*. 2005, vol.6, pp. 30-35.
3. Ogata K. Discrete-time control systems. Upper Saddle River, N.J.: Prentice hall, 1994.
4. Baryshnikov V. D., Bortsov Y.A., et al. Dynamics of thyristor electrical drives of the sections of paper machines. *J. Russian Electrical Technology*. 1973, vol.1, pp. 43-48.
5. Dochviri J. The optimization of transients in multi-motor thyristor electric drives with elastic links for the press mechanisms of continuous technological machines. *J. Russian Electrical Technology*. 2006, v. 2, pp. 34-42.
6. Kessler C. Das Symmetrische Optimum. *J. Regelungstechnik*. 1958, v.6, pp. 395-400.



Дочвири Джумбер Николаевич, д.т.н., профессор департамента электроэнергетики грузинского технического университета  
E-mail: Jumber\_Dochviri@yahoo.com