

УДК 621.313

Дж.Н.Дочвири, д-р техн. наук,
И.Дж.Дочвири, канд. физ.-мат. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЁТОМ УПРУГОСТЕЙ И ЗАЗОРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

Составлена математическая модель двухдвигательного электропривода с одним регулятором скорости и двумя тиристорными преобразователями при учете упругостей и зазоров механических передач. Методом пространства состояний переменных выведены передаточные функции объекта. Даны рекомендации по настройке регуляторов системы. В процессе моделирования в MATLAB получены близкие к оптимальным динамические характеристики.

Ключевые слова: динамика, двухдвигательный электропривод, моделирование.

J.N.Dochviri, Sc.D,
I.J.Dochviri, Ph.D

MODELLING OF DYNAMICAL REGIMES OF TWO-MOTOR ELECTRICAL DRIVES WITH ELASTICITIES AND GAPS OF THE MECHANICAL TRANSDUCERS

In the paper mathematical model of two-motor electrical drive with one speed controller and two thyristor transformers, by taking into account elasticities and gaps of mechanical transducers, is constructed. Using state-space methods the transfer functions of the object are defined. Recommendations for tunings of the regulators are obtained. Apply modeling on MatLab near to the optimal dynamical characteristics are obtained.

Keywords: dynamics, two-motor electrical drive, modeling.

Дж.Н.Дочвірі, д-р техн. наук,
І.Дж.Дочвірі, канд.фіз.-мат наук

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ДВОДВИГУНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНОСТІ І ЗАЗОРІВ МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ

Складено математичну модель дводвигунового електропривода з одним регулятором швидкості і двома тиристорними перетворювачами з урахуванням пружностей і зазорів механічних передач. Методом простору станів змінних виведено передавальні функції об'єкта. Надано рекомендації щодо налаштування регуляторів системи. В процесі моделювання у MATLAB одержано близькі до оптимальних динамічні характеристики.

Ключові слова: динаміка, дводвигуновий електропривод, моделювання.

Введение. Известными электротехническими фирмами (Siemens, AEG-telefunken, Nar-land и др.) с целью повышения надёжности технологических процессов и улучшения качества вырабатываемой продукции для различных механизмов машин предложены разные системы управления двухдвигательных тиристорных электроприводов. Например, системы: с одним регулятором скорости (РС) и одним (общим) тиристорным преобразователем (ТП); с индивидуальными каналами управления для каждого двигателя, т.е. система с двумя регуляторами скорости и индивидуальными тиристорными преобразователями к каждому двигателю; система при питании двигателей от общего преобразователя и с регулированием скоростей с помощью возбуждения двигателей и др.

Указанные системы управления двухдвигательных электроприводов не могут пропорционально распределять нагрузки

между двигателями без дополнительных контуров регулирования, т.е. без дополнительных датчиков и регуляторов, а их введение в схему управления усложняет настройку всей системы и понижает её надёжность [4,5]. Пропорциональное распределение нагрузки между двигателями без введения в схему управления дополнительных элементов и контуров регулирования обеспечивает схема двухдвигательного электропривода, представленная на рис. 1, разработанная автором настоящей работы [1,3]. На схеме: ТП1 и ТП2—тиристорные преобразователи; РТ1 и РТ2—регуляторы токов якорей двигателей; ДТ1 и ДТ2—датчики токов якорей двигателей; ДС1 и ДС2—датчики скоростей двигателей.

Целью работы является разработка рекомендаций по оптимизации регуляторов и корректоров данной системы управления двухдвигательного привода (рис. 1) с учётом упругостей и зазоров механических передач.

© Дочвири Д.Н., Дочвири И.Д., 2012

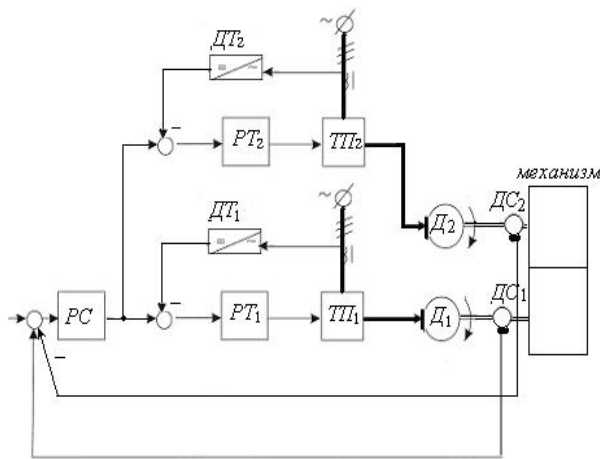


Рис. 1. Функциональная схема двухдвигательного привода с одним РС и двумя ТП

Материал и результаты исследований.

При допущении отсутствия скользящих между рабочими валами механизма и учете упругостей соединительных валов двигателей с механизмом и люфтов в шестеренках редукторов механическую систему двухдвигательного электропривода представим в виде трехмассовой. Уравнения движения рассматриваемого привода, с переменными в относительных приращениях от их значений в статике, записывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} &\mu_1 - \mu_{y1} = T_{M1} \frac{dv_1}{dt}; \\ &\mu_2 - \mu_{y2} = T_{M2} \frac{dv_2}{dt}; \\ &k_{H1}\mu_{y1} + k_{H2}\mu_{y2} - \mu_M = T_{MM} \frac{dv_M}{dt}; \\ &\mu_{y1} = \begin{cases} \frac{1}{T_{c1}} \int (v_1 - v_M) dt + \frac{T_{d1}}{T_{c1}} (v_1 - v_M), \\ \text{при } \Delta\Psi_{p1} \in]-\infty; -(1 + \Psi_{s1})[U] - 1; +\infty[\\ -1, \text{ при } \Delta\Psi_{p1} \in [-(1 + \Psi_{s1}); -1] \end{cases} \\ &\mu_{y2} = \begin{cases} \frac{1}{T_{c2}} \int (v_2 - v_M) dt + \frac{T_{d2}}{T_{c2}} (v_2 - v_M), \\ \text{при } \Delta\Psi_{p2} \in]-\infty; -(1 + \Psi_{s2})[U] - 1; +\infty[\\ -1, \text{ при } \Delta\Psi_{p2} \in [-(1 + \Psi_{s2}); -1] \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $\mu_1, \mu_2, \mu_{y1}, \mu_{y2}, \mu_M, v_1, v_2$ и v_M – соответственно относительные приращения крутящих моментов двигателей, упругих моментов механических передач (длинных соединительных валов) и механизма, а также угловых скоростей инерционных масс (в частности,

двигателей и механизма); $k_{H1} = \frac{M_{M1}}{M_{MC}}$ и

$k_{H2} = \frac{M_{M2}}{M_{MC}}$ – коэффициенты нагрузки каждого двигателя от общей статической нагрузки привода; M_{MC} – общий статический момент сопротивления привода; T_{M1}, T_{M2} и T_{MM} – механические постоянные времени инерционных масс привода; T_{d1} и T_{d2} – постоянные времени, характеризующие процесс затухания упругих колебаний за счет вязкого трения внутри соединительных валов; T_{c1} и T_{c2} – постоянные времени, характеризующие процессы деформации скручивания длинных валов; $\Delta\Psi_{p1} = \frac{\Delta\varphi_1}{\varphi_{c1}}$ $\Delta\Psi_{p2} = \frac{\Delta\varphi_2}{\varphi_{c2}}$ – относительные изменения углов скручивания длинных (соединительных) валов; $\varphi_{c1} = \frac{M_{M1c}}{c_1}$ и

$\varphi_{c2} = \frac{M_{M2c}}{c_2}$ – углы скручивания длинных валов при приложении соответственно моментов сопротивления M_{M1c} и M_{M2c} ; c_1 и c_2 – коэффициенты жёсткости длинных валов между двигателями и механизмом; $\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_M$ и $\Delta\varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_M$ – углы скручивания длинных валов; φ_{s1} и φ_{s2} – приведенные зазоры механических передач.

Для получения передаточных функций механической части рассматриваемой системы привода без учета люфтов в шестеренках редукторов от сигнала μ_1 к сигналу v_1 , а также от μ_2 к v_1 запишем уравнения (1) в форме Коши, т.е. в форме пространства состояния переменных:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

где: $x^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$; – пространства состояния системы в частности: угловых скоростей двигателей (x_1 и x_2), механизма (x_3) и упругих моментов длинных соединительных валов (x_4 и x_5); u – входные сигналы объекта (μ_1 и μ_2); y – выходной сигнал системы (v_1).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{M1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{M2}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_{H1}}{T_{MM}} & \frac{k_{H2}}{T_{MM}} \\ \frac{1}{T_{c1}} & 0 & -\frac{1}{T_{c1}} & -\frac{T_{d1}}{T_{c1}} \left(\frac{1}{T_{M1}} + \frac{k_{H1}}{T_{MM}} \right) & -\frac{T_{d1} \cdot k_{H2}}{T_{c1} \cdot T_{MM}} \\ 0 & \frac{1}{T_{c2}} & -\frac{1}{T_{c2}} & -\frac{T_{d2} \cdot k_{H1}}{T_{c2} \cdot T_{MM}} & -\frac{T_{d2}}{T_{c2}} \left(\frac{1}{T_{M2}} + \frac{k_{H2}}{T_{MM}} \right) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{M1}} \\ \frac{1}{T_{M2}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (4)$$

Из системы уравнений (2) получим общую формулу для определения передаточных функций

$$W(s) = C(sE - A)^{-1} \cdot B, \quad (5)$$

где $s = d/dt$ – оператор дифференцирования; E -единичная матрица размером 5x5.

Подставляя A и B из (3) и (4) в (5), находим передаточные функции механической части привода относительно угловой скорости первого двигателя:

$$W_{01}(s) = \frac{\nu_1(s)}{\mu_1(s)} = \frac{k_{H1} \left[1 + \frac{T_1^2 s^2 (T_2^2 s^2 + 2\xi_1 T_2 s + 1)}{k_{H1} (T_{d1} s + 1)(T_{d2} s + 1)} \right]}{T_{M\Sigma} s N(s)}, \quad (6)$$

$$M_{12}(s) = \frac{\nu_1(s)}{\mu_2(s)} = \frac{k_{H2}}{T_{M\Sigma} s N(s)}, \quad (7)$$

где $T_1 = \sqrt{k_{H1} T_{M2} T_{c2} + (k_{H2} T_{M2} + T_{MM}) T_{c1}}$;

$$T_2 = \frac{\sqrt{T_{M2} T_{MM} T_{c1} T_{c2}}}{T_1};$$

$$\xi_1 = \frac{k_{H1} T_{M2} T_{c2} T_{d1} + (k_{H2} T_{M2} + T_{MM}) T_{c1} T_{d2}}{2T_1^2 T_2};$$

$$N(s) = 1 + \frac{T_{M1} T_{M2} T_3 s^2 (T_4 s + 1)}{T_{M\Sigma} (T_{d1} s + 1)(T_{d2} s + 1)} \times \left[1 + \frac{T_{MM} T_5^2 (T_6^2 s^2 + 2\xi_2 T_6 s + 1)}{T_{M1} T_{M2} T_3 (T_4 s + 1)} \right];$$

$$T_3 = k_{H1} T_{c2} + k_{H2} T_{c1};$$

$$T_4 = \frac{k_{H1} T_{c2} T_{d1} + k_{H2} T_{c1} T_{d2}}{T_3};$$

$$T_5 = \sqrt{T_{M1} T_{c1} + T_{M2} T_{c2}};$$

$$T_6 = \frac{\sqrt{T_{M1} T_{M2} T_{c1} T_{c2}}}{T_5};$$

$$\xi_2 = \frac{T_{M1} T_{c1} T_{d2} + T_{M2} T_{c2} T_{d1}}{2T_5^2 T_6};$$

$T_{M\Sigma} = k_{H1} T_{M1} + k_{H2} T_{M2} + T_{MM}$ – суммарная механическая постоянная времени привода.

Оптимизацию рассматриваемой системы проведем для привода со следующими параметрами: $P_{Д1} = 300$ кВт; $P_{Д2} = 100$ кВт; $k_{H1} = 0,7$; $k_{H2} = 0,3$; $T_{M1} = 1,5$ с; $T_{M2} = 1,5$ с; $T_{MM} = 10$ с; $T_{d1} = T_{d2} = 0,002$ с; $T_{c1} = 0,0004$; $T_{c2} = 0,00035$ с.

Передаточная функция объекта регулирования всей системы, т.е. системы от сигнала выходного напряжения РС к сигналу угловой скорости первого (главного) двигателя, с учётом оптимизированных токовых контуров

$$W_{об}(s) = \frac{\nu_1(s)}{\nu_{pc}(s)} = \frac{W_{01}(s) + M_{12}(s)}{k_1 (T_{\Sigma 2} s + 1)}, \quad (8)$$

где ν_{pc} – относительное приращение выходного напряжения РС; k_1 – коэффициент передачи датчиков токов якорей двигателей ($k_1 = 0,1$); $T_{\Sigma 2}$ – малая постоянная времени оптимизированных токовых контуров, ($T_{\Sigma 2} = 0,01$ с).

При принятых значениях параметров привода (8) примет вид

$$W_{об}(s) = \frac{0,48s^4 + 9,84s^3 + 4150s^2 + 7000s + 300000}{s(0,00072s^5 + 0,2s^4 + 8,9s^3 + 786,6s^2 + 15560s + 1110000)}. \quad (9)$$

Синтез регулятора скорости данного привода произведём с помощью метода частотных характеристик (т.е. диаграмм Бode) компьютерной программы *MATLAB*.

На рис. 2 представлены логарифмические амплитудная $L_{об}$ и фазовая $\varphi_{об}$ частотные

характеристики (т.е. диаграммы Бode), соответствующие (9). Полученная амплитудная характеристика на частоте $\omega_y = \frac{1}{\sqrt{T_{M1}T_{c1}}} = 42, \text{сек}^{-1}$ имеет небольшой резонансный пик, поэтому в первом приближении настройку регуляторов можно произвести точно, так как это рекомендуется для привода с жёсткими соединительными валами.

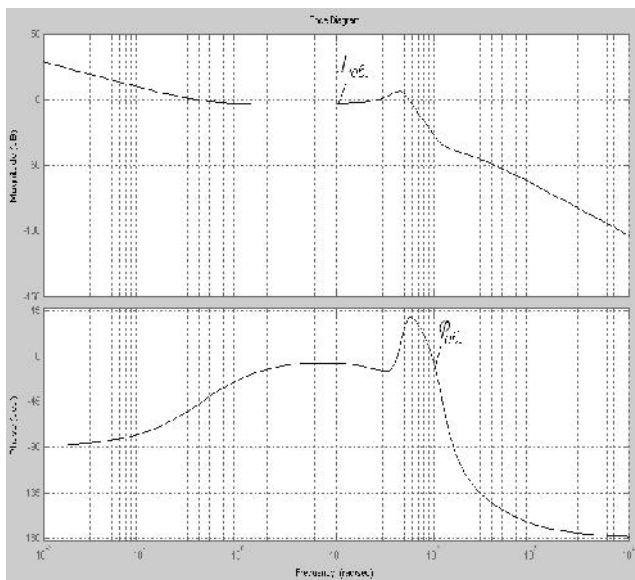


Рис. 2. Логарифмические амплитудная $L_{об}$ и фазовая $\varphi_{об}$ частотные характеристики объекта с оптимизированными токовыми контурами

На рис. 3 представлена детализированная структурная схема исследуемой системы двухдвигательного тиристорного электропривода с учётом упругостей и зазоров механических передач. На этой схеме кроме вышеотмеченных имеются: β_1 и τ_1 – динамический коэффициент усиления и постоянная времени РС; $\beta_2, \tau_2, \beta'_2, \tau'_2$ – параметры РТ₁ и РТ₂; $\kappa_{I1}, T_{I1}, \kappa_{I2}, T_{I2}$ – коэффициенты усиления и постоянные времени ТП₁ и ТП₂; $\kappa_{J1}, T_{J1}, \kappa_{J2}, T_{J2}$ – коэффициенты усиления и постоянные времени ДТ₁ и ДТ₂; $\kappa_{Я1}, T_{Я1}, \kappa_{Я2}, T_{Я2}$ – коэффициенты передач и постоянные време-

ни якорных цепей электродвигателей Д₁ и Д₂; T_{Φ} – постоянная времени фильтров после датчиков скоростей (ДС₁ и ДС₂); Ψ_{31} и Ψ_{32} – зазоры механических передач; υ_y – относительное приращение сигнала управления системы привода; $\upsilon_{ДС1}$ и $\upsilon_{ДС2}$ – относительные приращения выходных напряжений датчиков скоростей (ДС₁ и ДС₂); $\upsilon_{ДТ1}$ и $\upsilon_{ДТ2}$ – относительные приращения выходных напряжений датчиков токов якорей электродвигателей; $\epsilon_{ТП1}$ и $\epsilon_{ТП2}$ – относительные приращения выходных ЭДС. ТП₁ и ТП₂; $\epsilon_{Д1}$ и $\epsilon_{Д2}$ – относительные приращения ЭДС электродвигателей; $\iota_{Я1}$ и $\iota_{Я2}$ – относительные приращения токов якорей (т.е. вращающих моментов) электродвигателей.

В процессе моделирования на компьютере регуляторы токов рассматриваемой системы электропривода (РТ₁ и РТ₂) настраивались по общеизвестным условиям „модульного оптимума”, а регулятор скорости по „симметричному оптимуму” [3–4].

В процессе моделирования системы (рис. 3) на компьютере для реализации характеристик зазоров при записи переменных в относительных приращениях (см. III, на рис. 4) были использованы характеристики блока люфта (II, рис. 4) и блока насыщения (I, рис. 4). Эти блоки в процессе моделирования были включены параллельно по схеме суммирования сигналов.

В результате моделирования переходных процессов рассматриваемой упругой системы двухдвигательного электропривода с учётом зазоров в механических передачах в *MATLAB* динамические характеристики без введения дополнительных гибких обратных связей по скоростям были недопустимо (сильно) колеблющимися (рис. 5, а).

После введения на вход РС гибких обратных связей по отдельным двигателям с передаточной функцией

$$W_{зoc}(s) = \frac{0,02 s}{0,002 s + 1} \quad (10)$$

динамические характеристики привода значительно улучшились (рис. 5, б, в).

Показатели качества (быстродействие составляет $t_g \leq 1c$, перерегулирование

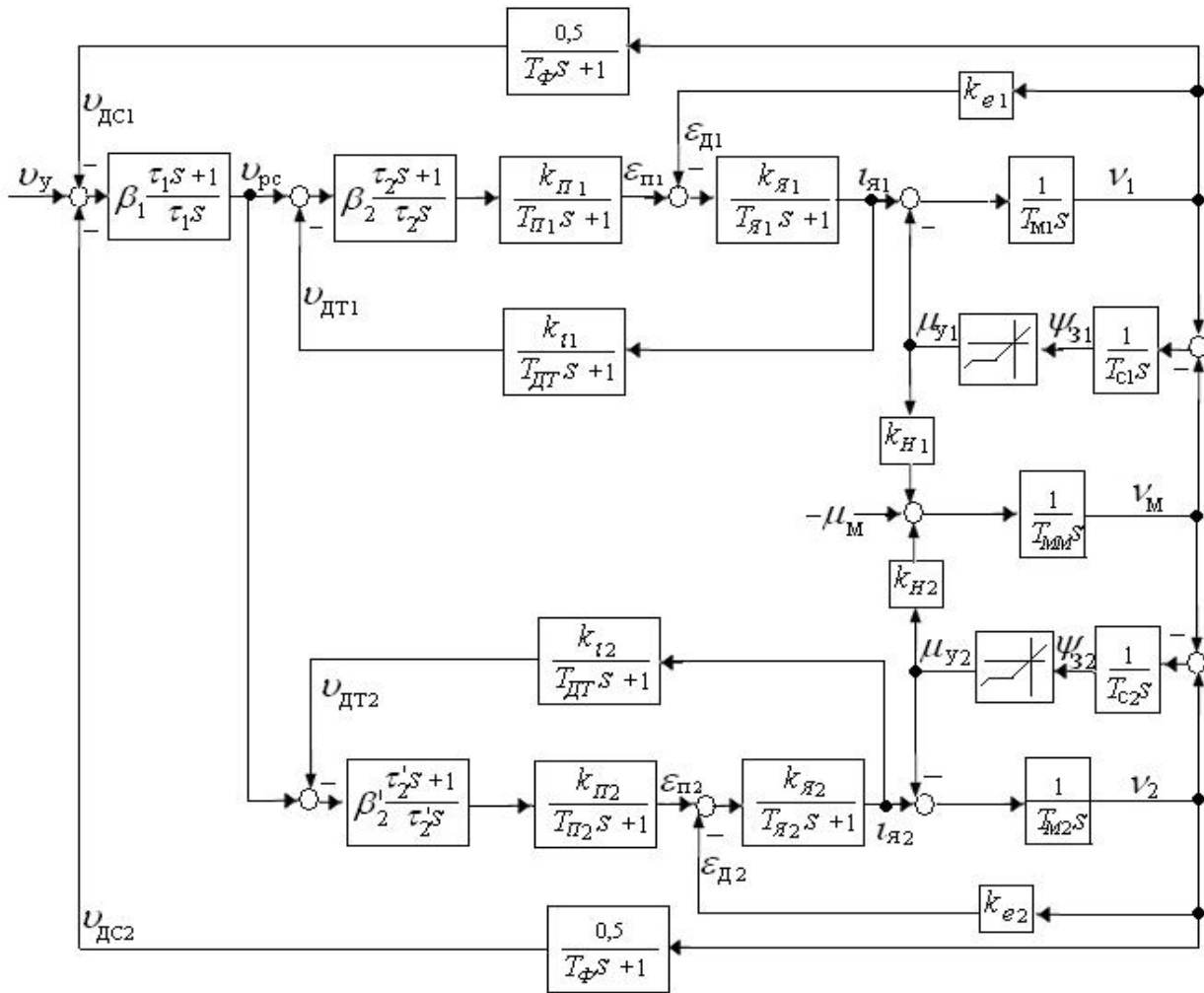


Рис. 3. Структурная схема упругого двухдвигательного тиристорного привода при наличии зазоров в кинематических парах

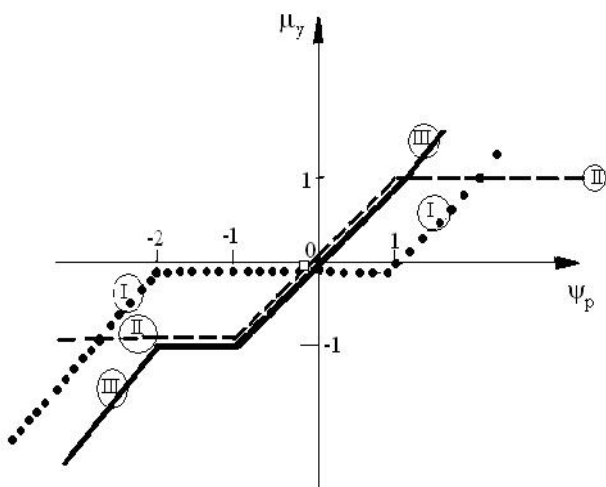
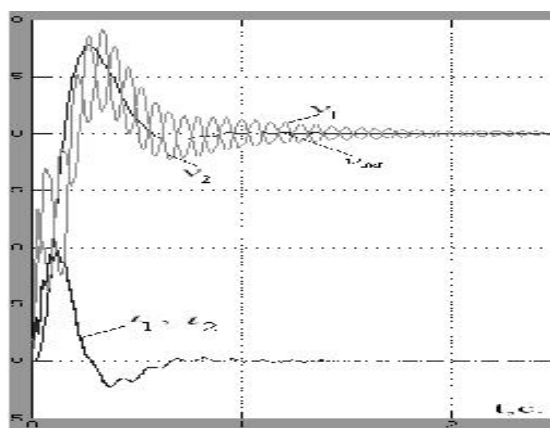


Рис. 4. Характеристики блока люфта (I), блока насыщения (II) и зазора (III)

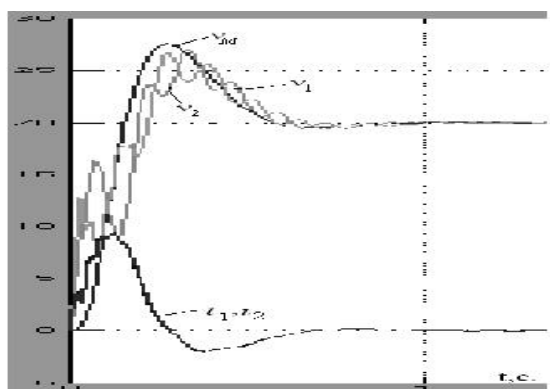
$\sigma = 35\%$ и динамическое падение скорости $\Delta v \leq 0,15$) системы близки к оптимизированным [2, 5].

Исследованиями установлено, что для пропорционального распределения нагрузки между двигателями по рассматриваемой системе управления (рис. 1) необходимо выбрать коэффициенты передачи датчиков токов якорей двигателей обратно пропорционально мощностям электродвигателей.

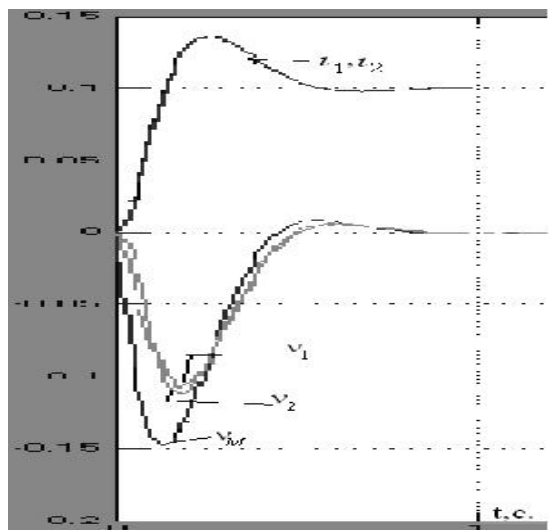
Выводы. Составлена математическая модель в виде структурной схемы двухдвигательного электропривода с одним регулятором скорости и индивидуальными тиристорными преобразователями для каждого двигателя отдельно при учете упругостей и зазоров механических передач.



а



б



в

Рис. 5. Кривые переходных процессов при ступенчатом воздействии на систему:
 а – по управлению, но без коррекции;
 б – по управлению с коррекцией;
 в – по нагрузке, с коррекцией; v_1, v_2, v_M – относительные приращения угловых скоростей двигателей и механизма; i_1, i_2 – относительные приращения токов якорей двигателей

Методом пространства состояний переменных выведены обобщенные передаточные функции объекта регулирования системы относительно угловой скорости главного (первого) двигателя электропривода, с помощью которых получены логарифмические частотные характеристики.

На базе частотного анализа даны рекомендации по настройке регуляторов скорости, токов двигателей и корректоров системы. В процессе исследования динамических режимов системы двухдвигательного привода в MATLAB определены оптимальные параметры гибких обратных связей. Полученные кривые переходных процессов в различных режимах работы являются близкими к оптимизированным ($t_0 \leq 1c$, $\sigma = 35\%$ и $\Delta v \leq 0,15$).

Список использованной литературы

1. Барышников В.Д. Динамика двухдвигательного электропривода с одним регулятором скорости и двумя тахогенераторами / В. Д. Барышников, Дж. Н. Дочвири. // Сообщ. АН Грузии. – 1976. – Т. 84(1). – С.169–172.
2. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 290 с.
3. Дочвири Дж. Н. Динамика двухдвигательного электропривода с одним регулятором скорости и двумя тиристорными преобразователями / Дж. Н. Дочвири, О.Г. Кервалишвили // Сообщ. АН Грузии. – 1978. – Т. 91(2). – С.421–424.
4. 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.
5. Дочвири Дж. Н. Оптимизация переходных процессов многодвигательных тиристорных электроприводов с упругими связями для прессовых механизмов непрерывных технологических машин / Дж. Н. Дочвири // Электричество. – М.: – 2006. – № 2. – С. 34–42.

6. W. Leonhard Control of Electrical Drives / Springer–Technology & Engineering – 2001. – 460 p.

Получено 12.02.2012

References

1. Barishnikov V.D., Dochviri J.N. Dynamics of two-motor electric drive with a single speed regulator and two tachogenerators / Bulletin of Academy Sciences of the Georgian SSR”–1976. – № 84(1). – P. 169–172 [in Russian].

2. Bortsov Yu.A., Sokolovskii G.G. Automated electrical drives with elastic connections. – St.–Petersburg: Energoatomizdat. –1992 – 290 p. [in Russian].

3. Dochviri J.N., Kervalishvili O.G. Dynamics of two–motor electric drive with single speed regulator and two thiristor transformers / Bulletin of Academy Sciences of the Georgian SSR”– 1978. – № 91(2). – P.421–424 [in Russian].

4. Dochviri J.N., Dochviri I.J., Beradze N.J Dynamics of control systems of thyristor electric drives with an electric motor excitation control / Technical Electrodynamics. – Kiev: – 2005. – № 6. – P. 30–35 [in Ukrainian].

5. Dochviri J.N. The Optimization of transients in multimotor thyristor electric drives with elastic links for press mechanisms of continuous technological machines / ELETRICHESTVO. – Moscow: RAN-2006. – № 2. – P. 34–42 [in Russian].

6. W. Leonhard Control of Electrical Drives / Springer – Technology & Engineering – 2001. – 460 p. [in English].



Дочвири
Джумбер Николаевич,
профессор каф. Электро-
оборудования пром. пред-
приятий Грузинского тех-
нич. ун-та,
E-mail:
Jumber_Dochviri@yahoo.com



Дочвири
Ираклий Джумберович,
ассоциированный профес-
сор математики Кавказского
международного ун-та,
E-mail:
Iraklidoch@yahoo.com