

УДК 621.313

**Дж. Н. Дочвири**, д-р техн. наук,  
**Н. Дж. Берадзе**, канд. техн. наук

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВОЗБУЖДЕНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАГРУЗКИ**

***Аннотация.** Построена система управления двухдвигательным электроприводом для современных прессов бумагоделательных машин, которая имеет один регулятор скорости и индивидуальные регуляторы для якорных токов и токов возбуждений двигателей при их питании от общего преобразователя бумагоделательной машины. Система обеспечивает пропорциональное распределение нагрузки между двигателями без дополнительных контуров и регуляторов. Составлена математическая модель динамики привода с учетом упругостей механических передач. Даны рекомендации по настройке регуляторов, датчиков токов и корректора системы, которые обеспечивают оптимизированные динамические характеристики привода.*

***Ключевые слова:** двухдвигательный электропривод, регулирование возбуждением, автоматическое распределение нагрузки, динамика*

**J. N. Dochviri**, ScD.,  
**N. J. Beradze**, Ph.D.

### **CONTROL SYSTEM OF TWO-MOTOR ELECTRICAL DRIVE BY THE REGULATION OF EXCITEMENT AND AUTOMATIC DISTRIBUTION OF LOADING**

***Abstract.** In the paper we present the system of two-motor electrical drive for modern press mechanisms of paper machines, that has one regulator and individual regulators for anchor currents and excitement currents of the motors by their supply from common converter of the paper machine. Mathematical model of the dynamics of electrical drive by taking into account elasticities of mechanical transmissions is given. For tuning of the regulators, sensors of currents and corrector, which provide optimized dynamical characteristics of the drive and proportional distribution of load between the motors without additional contours and regulators are suggested.*

***Keywords:** two-motor electrical drive, individual regulators, sensors of currents and correctors, dynamic*

**Дж. Н. Дочвірі**, д-р техн. наук,  
**Н. Дж. Берадзе**, канд. техн. наук

### **СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДВОДВИГУННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗБУДЖЕННЯ ДВИГУНІВ І АВТОМАТИЧНИМ РАЗПОДІЛЕННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ**

***Анотація.** Побудована система управління дводвигуном електроприводом для сучасних пресів папероробних машин, яка має один регулятор швидкості та індивідуальні регулятори для якорних струмів і струмів збудження двигунів при їх живленні від загального перетворювача папероробних. Система забезпечує пропорційний розподіл навантаження між двигунами без додаткових контурів і регуляторів. Складено математичну модель динаміки приво­ду з урахуванням пружних механічних передач. Наведені рекомендації щодо налаштування регуляторів, датчиків струмів і інших коректорів в системі, які забезпечують оптимізовані динамічні характеристики приво­ду.*

***Ключові слова:** дводвигуновий електропривод, регулювання збудженням, автоматичний розподіл навантаження, динаміка*

#### **Введение**

Вопросы динамики секционных электроприводов буммашин, в том числе двухдвигательных приводов, с индивидуальными тиристорными преобразователями при учете упругостей механических передач рассмотрены в ряде работ [1; 3 – 4]. Однако известными электротехническими фирмами (Siemens,

АEG-telefunken, Harland и др.) с целью повышения качества вырабатываемой продукции для прессов буммашин также предлагаются системы двухдвигательных приводов, в которых питание якорных цепей двигателей осуществляется от общего преобразователя (ОП) машины и регулирование соотношений скоростей секций ведется в их цепях возбуждения.

© Дочвири Дж. Н., Берадзе Н. Дж., 2014

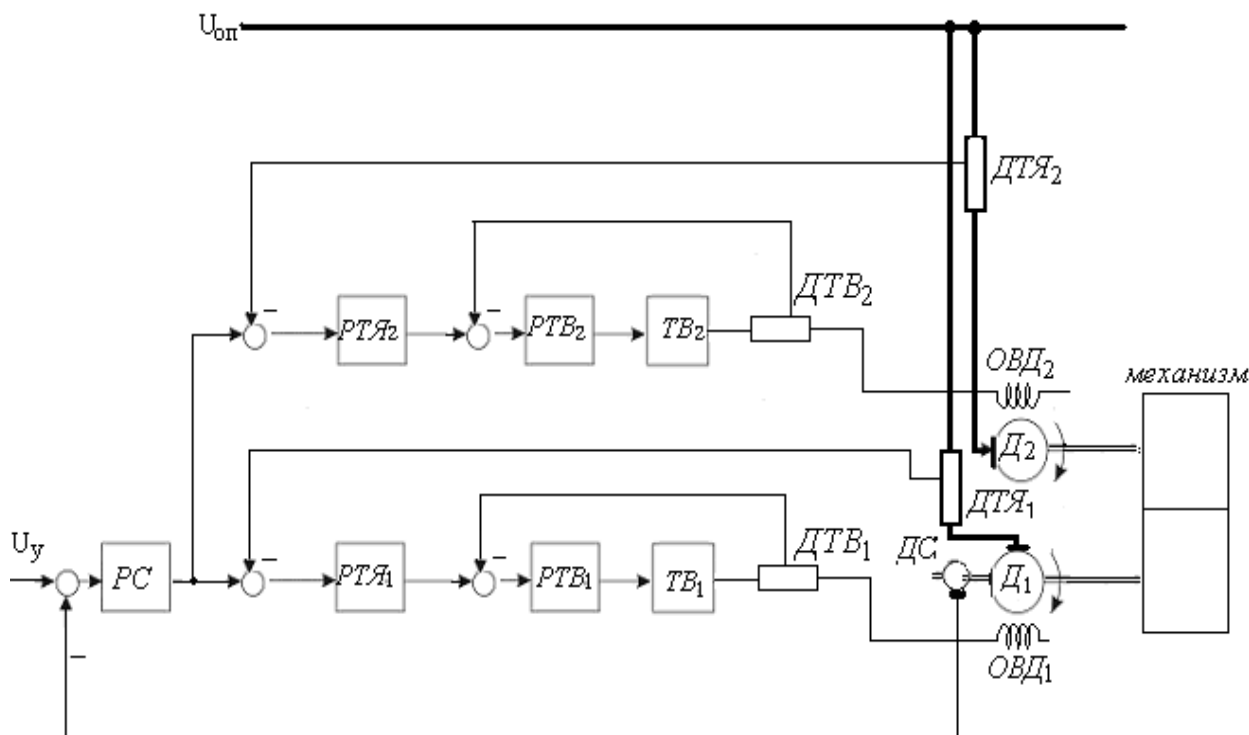


Рис. 1. Функциональная схема двухдвигательного электропривода с одним РС и индивидуальными регуляторами токов якорей и возбуждений двигателей

Такие системы имеют свои особенности, в частности с точки зрения оптимизации их динамических характеристик и распределения нагрузки между двигателями привода. Разработанные фирмами системы управления двухдвигательных приводов не могут пропорционально распределять нагрузки между двигателями без дополнительных контуров или перекрёстных связей, а их введение в схему управления усложняет настройку всей системы и понижает её надёжность.

#### Моделирование и оптимизация динамических характеристик сложной системы электропривода

Пропорциональное распределение нагрузки между двигателями кроме схемы, рассмотренной в [5], обеспечивает ниже приведённая схема (рис.1) двухдвигательного привода, составленная авторами настоящей работы.

В приведённой на рис. 1 функциональной схеме привода верхний и нижний рабочие валы пресса приводятся во вращение от электродвигателей Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub> при питании якорных обмоток от ОП. Изменение уровня скорости машины производится согласованным изменением  $U_{оп}$  и ведущего (управляющего) напряжения  $U_y$ . Данная система

управления приводом имеет один (общий) регулятор скорости (РС) и построена по принципу последовательной коррекции и подчиненными контурами регулирования токов якорей и возбуждений двигателей.

На рис. 1 кроме вышеуказанных имеются следующие обозначения: РТЯ<sub>1</sub>, РТЯ<sub>2</sub>, ДТЯ<sub>1</sub> и ДТЯ<sub>2</sub> – регуляторы и датчики токов якорей электродвигателей; РТВ<sub>1</sub>, РТВ<sub>2</sub>, ДТВ<sub>1</sub> и ДТВ<sub>2</sub> – регуляторы и датчики токов возбуждения электродвигателей; ТВ<sub>1</sub> и ТВ<sub>2</sub> – тиристорные возбуждители двигателей; ДС – датчик скорости привода.

С целью разработки рекомендаций по оптимизации регуляторов и корректора данной системы управления, а также по настройке датчиков токов якорей для правильного распределения нагрузки между двигателями привода при учёте упругостей механических передач необходимо произвести исследование её динамических режимов моделированием на компьютере в программе *MATLAB*. Для решения указанных задач необходимо иметь математическая модель рассматриваемой системы привода.

При допущении отсутствия скольжения между рабочими валами пресса рассматриваемый механизм можно принять, как единый

(представленный в одной массе), а всю механическую систему двухдвигательного привода при учёте упругостей механических передач трёхмассовой разветвленными упругими связями [2; 7 – 8].

Динамика электроприводов буммашин обычно изучается в линейном приближении, поэтому дифференциальные уравнения движения рассматриваемого двухдвигательного привода с упругими связями в относительных приращениях переменных в операторной форме ( $s = d / dt$ ) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_i - \Delta\mu_{yi}(s) &= T_{Mi} s \Delta v_i(s); \\ \sum_{i=1}^2 k_{Hi} \Delta\mu_{yi}(s) - \Delta\mu_M(s) &= T_{MM} s \Delta v_M(s); \quad (1) \\ \Delta\mu_{yi}(s) &= \frac{T_{di} s + 1}{T_{ci} s} [\Delta v_i(s) - \Delta v_M(s)], \quad i = (1;2) \end{aligned}$$

где  $\Delta\mu_i$ ,  $\Delta\mu_{yi}$ ,  $\Delta\mu_M$ ,  $\Delta v_i$  и  $\Delta v_M$ ,  $i = (1;2)$  – соответственно относительные приращения моментов двигателей, упругих механических передач и сопротивления механизма, угловых скоростей инерционных масс (в частности, двигателей и механизма);  $T_{Mi}$ ,  $T_{MM}$  – механические постоянные времени двигателей и механизма;  $T_{di}$ ,  $T_{ci}$  – постоянные времени, учитывающие упругие и демпфирующие свойства механических передач привода;  $k_{Hi}$  – коэффициенты распределения нагрузок между двигателями;

Со своей стороны относительные приращения моментов двигателей при регулировании скоростей с изменением их возбуждений приравниваются к сумме приращений якорных токов и магнитных потоков двигателей, т.е.

$$\Delta\mu_i = \Delta I_{yi}(s) + \Delta\varphi_i(s), \quad i = (1;2). \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения напряжений и токов якорных цепей и цепей обмоток возбуждения двигателей, а также их магнитных потоков в относительных приращениях будут иметь вид [7]:

$$0 = \frac{1}{k_{yi}} (T_{yi} s + 1) \Delta I_{yi}(s) + k_{ei} [\Delta v_i(s) + \Delta\varphi_i(s)];$$

$$\Delta i_{Bi}(s) = \frac{T_{BTi} s + 1}{T_{B\Xi} s + 1} \Delta v_{Bi}(s); \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_i(s) = \frac{k_{Bi}}{T_{BTi} s + 1} \Delta I_{Bi}(s), \quad i = (1;2),$$

где кроме вышеуказанных обозначений имеем:  $\Delta i_{Bi}$  и  $\Delta v_{Bi}$ ,  $i = (1;2)$  – относительные приращения токов и напряжений возбуждений двигателей;  $k_{yi}$ ,  $k_{ei}$  – коэффициенты передач двигателей, учитывающие жесткость их механических характеристик в разомкнутой системе;  $k_{Bi}$  – коэффициенты линеаризации кривых намагничивания двигателей;  $T_{zi}$ ,  $T_{BTi}$ ,  $T_{B\Xi}$  – электромагнитные постоянные времени якорных цепей, контуров вихревых токов и токов возбуждений двигателей.

Следует отметить, что в первом уравнении системы (3) соответствующая величина якорного напряжения двигателя отсутствует из-за того, что она в процессе регулирования при данной рабочей скорости машины не меняется.

На основе уравнений (1) – (3) и общеизвестных передаточных функций для других элементов системы рассматриваемого двухдвигательного электропривода (регуляторов и датчиков) на рис. 2 составлена его математическая модель в виде детализированной структурной схемы.

На схеме рис. 2 кроме вышеуказанных величин имеются следующие обозначения:  $\Delta v_{PC}$ ,  $\Delta v_{OC1}$ ,  $\Delta v_{PT1}$ ,  $\Delta v_{PT2}$ ,  $\Delta v_{OC2}$  и  $\Delta v'_{OC2}$  – соответственно относительные приращения напряжений на выходе РС, обратных связей по скорости двигателей, на выходе регуляторов  $PT1$  и  $PT2$ , а также обратных связей по токам якорей двигателей;  $\Delta\varepsilon_{d1}$ ,  $\Delta\varepsilon_{d2}$ ,  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$  – относительные приращения ЭДС и токов якорей двигателей;  $\beta_1$  и  $\tau_1$  – динамический коэффициент усиления и постоянная времени РС;  $\beta_2$ ,  $\tau_2$  и  $\beta_2'$ ,  $\tau_2'$  – динамические коэффициенты усиления и постоянные времена  $PT1$  и  $PT2$ ;  $k_{П1}$ ,  $T_{П1}$  и  $k_{П2}$ ,  $T_{П2}$  – коэффициенты усиления и эквивалентные постоянные времена  $T_{B1}$  и  $T_{B2}$ ;  $k_{y1}$ ,  $T_{y1}$  и  $k_{y2}$ ,  $T_{y2}$  –

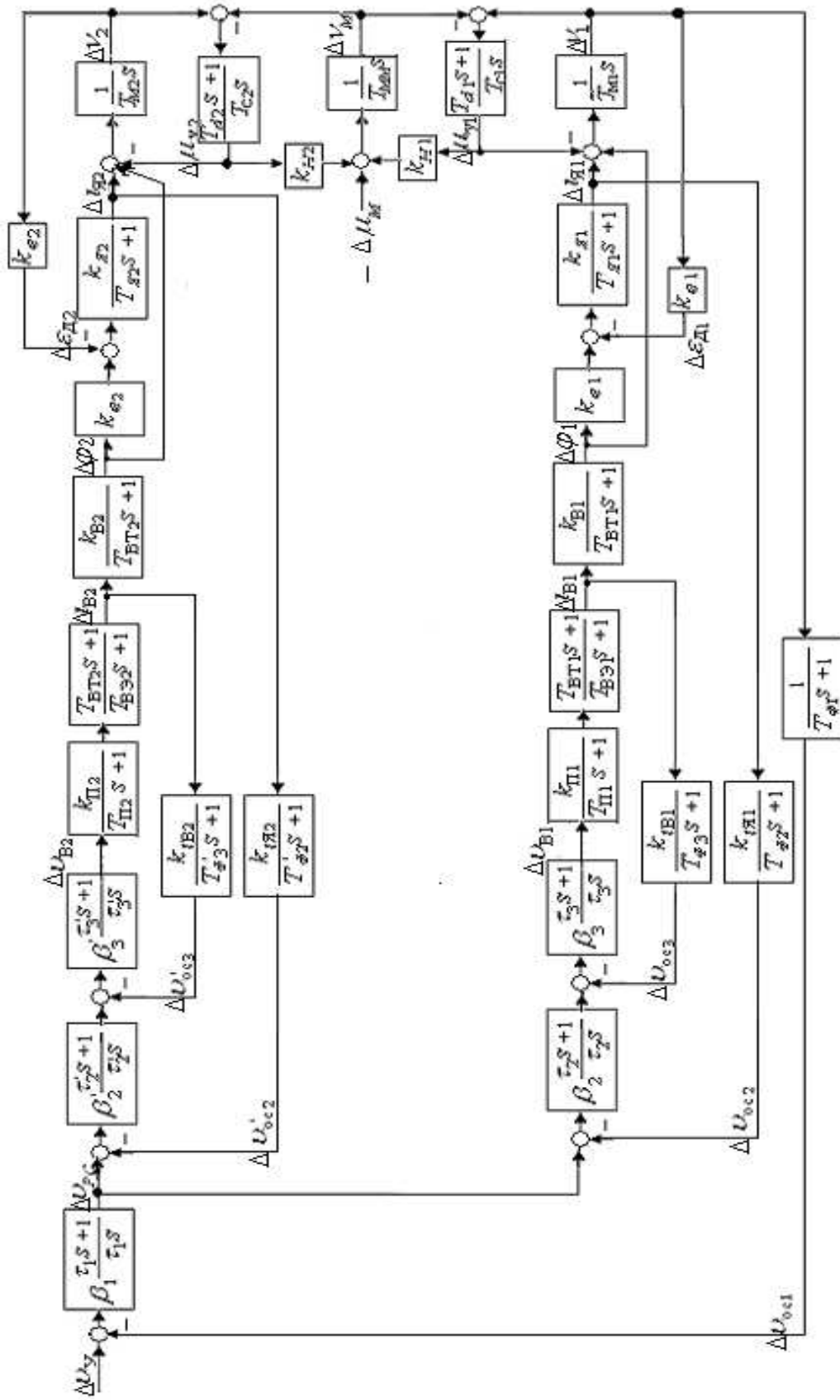


Рис. 2. Структурная схема двухдвигательного электропривода с одним РС и индивидуальными регуляторами токов якорей и возбуждений двигателей при учете упругостей механических передач

коэффициенты передач и электромагнитные постоянные времени якорных цепей электродвигателей;  $k_{iЯ1}$  и  $k_{iЯ2}$  – коэффициенты передач датчиков токов якорей с учётом согласующего коэффициента  $k_{iЯ} = k_{дТ} \alpha_{дТ}$ , где  $k_{дТ} = U_{дТ} / I_{ЯСТ}$  и  $\alpha_{дТ} = I_{ЯСТ} / U_{У.СТ}$ ;  $T_{\phi1}, T_{\phi2}$  и  $T_{\phi3}$  – постоянные времени фильтров после датчиков скорости, токов якорей и возбуждений.

С целью детального изучения динамических режимов рассматриваемого электропривода и вопроса правильного распределения нагрузки между двигателями исследования проводились на компьютере с помощью программы MATLAB. Компьютерная структурная схема предложенной системы управления двухдвигательного электропривода с числовыми значениями параметров и учётом упругостей механических передач представлена на рис. 3.

Оптимизацию рассмотренной системы проведем для привода со следующими параметрами:

$$P_{д1} = 300 \text{ кВт};$$

$$P_{д2} = 100 \text{ кВт};$$

$$U_{д1НОМ} = U_{д2НОМ} = 440 \text{ В};$$

$$\omega_{дНОМ} = \omega_{д2НОМ} = 157,2 \frac{\text{рад}}{\text{сек}};$$

$$k_{н1} = 0,6; k_{н2} = 0,4; T_{M1} = 1,5 \text{ с};$$

$$T_{M2} = 1,2 \text{ с}; T_{MM} = 10 \text{ с};$$

$$T_{d1} = T_{d2} = 0,002 \text{ с}; T_{c1} = T_{c2} = 0,0004 \text{ с}.$$

Для быстрого протекания переходного процесса настройку внутреннего контура системы, т.е. выбор параметров регуляторов РТВ следует определять по следующим формулам:

$$\tau_{3i} = T_{Bэi}; \beta_{3i} = \frac{T_{Bэi}}{10 \cdot k_{\Pi i} \cdot k_{iBi} T_{\Pi i}}, i = (1; 2). \quad (4)$$

Настройку динамики контуров якорных токов двигателей выполним на верхнем пределе уровня скорости по «модальному оптимуму» [7; 9], при котором обеспечиваются лучшие переходные процессы, и на

нижнем пределе уровня скорости буммашин. Параметры регуляторов РТЯ могут быть определены по формулам:

$$\tau_{2i} = T_{Яi};$$

$$\beta_{2i} = \frac{T_{Яi} k_{iBi}}{2 k_{Bi} \cdot k_{ei} \cdot k_{Яi} \cdot k_{iЯ} \cdot T_{\Sigma 2}}, \quad (5)$$

где  $T_{\Sigma 2} = T_{\Pi i} + T_{\phi 2}$  – некомпенсируемая малая постоянная времени контура тока якоря.

Настройку РС можно выполнять как для привода с жёстким соединительным валом, так и при учёте упругих свойств механического вала согласно условий по т.н. «симметричного оптимума» [10]:

$$\beta_1 = \frac{k_{iЯ} T_{M\Sigma}}{2 T_{\Sigma 1}}; \quad \tau_1 = 4 T_{\Sigma 1}, \quad (6)$$

где  $k_{iЯ}$  – коэффициент передачи датчиков токов якорей;  $T_{M\Sigma}$  – суммарная механическая постоянная времени привода;  $T_{\Sigma 1} = T_{\phi 1} + 2(T_{\phi 2} + T_T)$  – некомпенсируемая малая постоянная времени скоростного контура.

В результате моделирования рассматриваемой упругой системы двухдвигательного электропривода динамические характеристики без введения дополнительной гибкой обратной связи (ГОС) были недопустимо колеблющимися (рис. 4, а). После введения на вход РС корректирующей ГОС по скорости главного (первого) двигателя с передаточной функцией

$$W_{ГОС}(s) = \frac{0,05s}{0,001s + 1}, \quad (7)$$

динамические характеристики привода значительно улучшились (см. переходные кривые скоростей двигателей и механизма (рис. 4, б), полученные при подаче ступенчатого сигнала на вход системы, а также (рис. 4, в), полученные при набросе нагрузки со стороны механизма). Одинаковые изменения (в относительных единицах) моментов двигателей ( $\mu_1$  и  $\mu_2$ ) подтверждают, что предложенная система управления двухдвигательным электроприводом с одним РС с высокой точностью обеспечивает пропорциональное распределение нагрузки между двигателями.

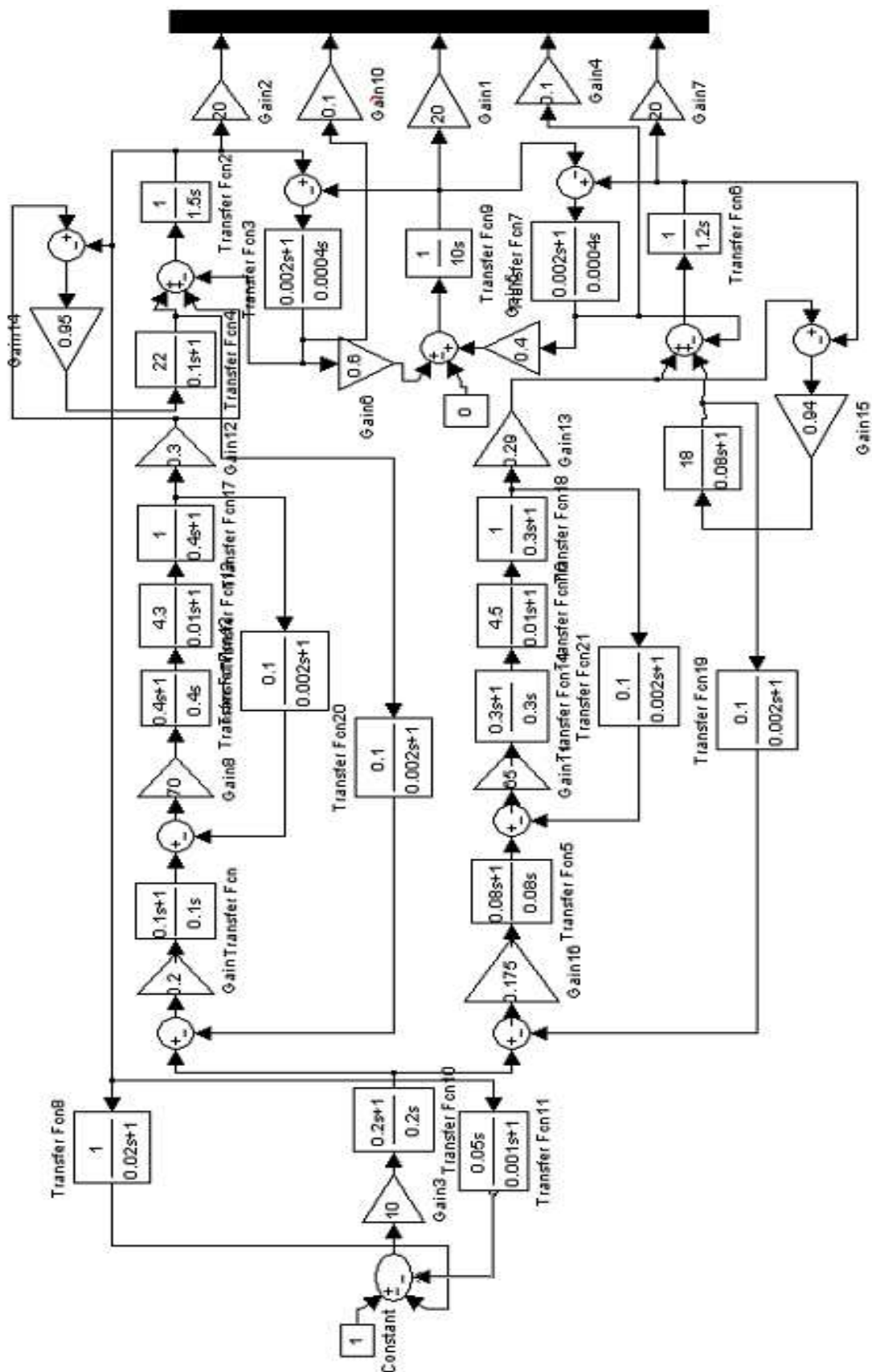


Рис. 3. Компьютерная структурная схема упругого двухдвигательного электропривода с одним РС и индивидуальными регуляторами токов якорей и возбуждений двигателей

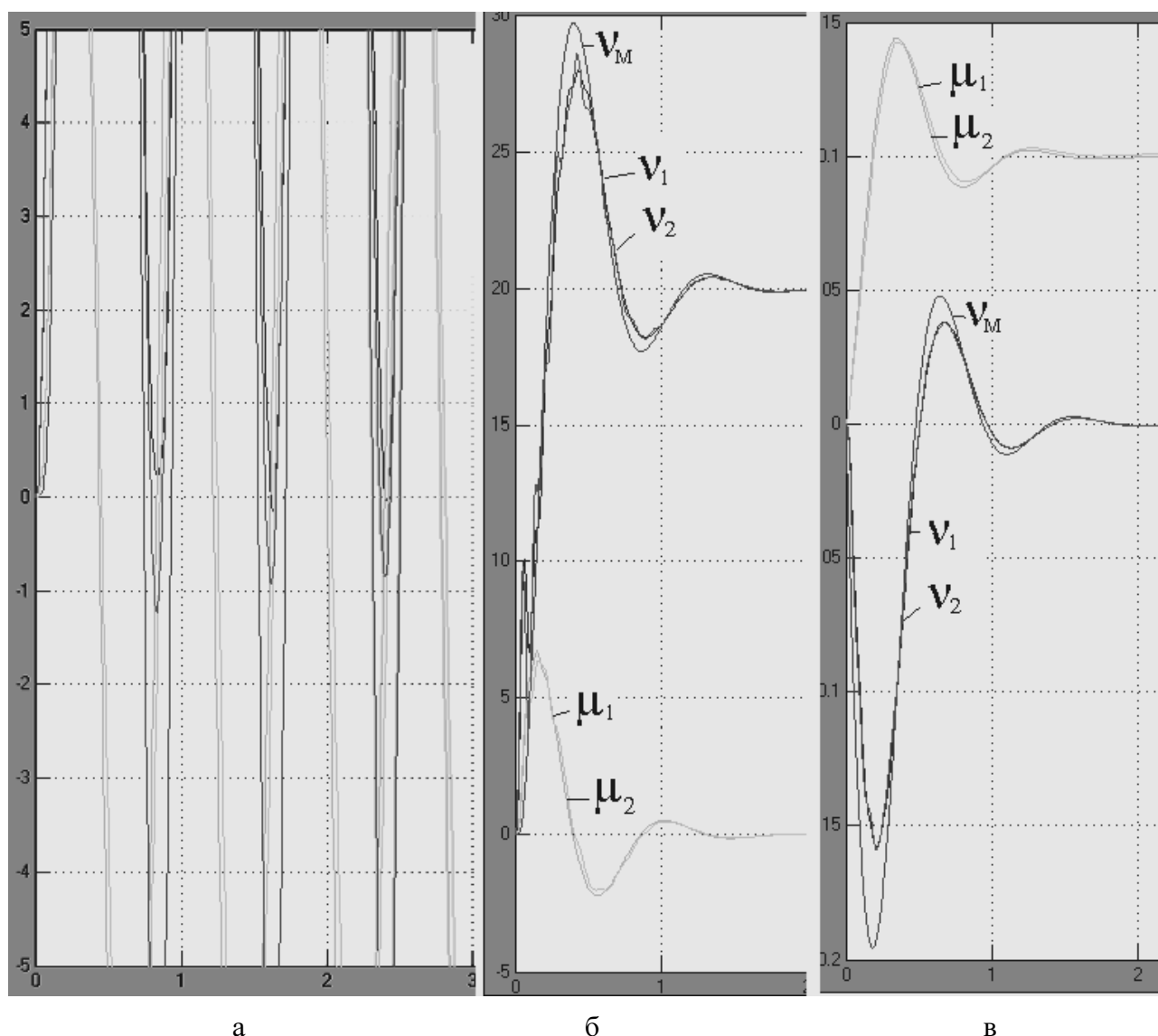


Рис. 4. Кривые переходных процессов скоростей двигателей и механизма, а также моментов двигателей при ступенчатом воздействии на систему: а) по управлению и без коррекции; б) по управлению и с коррекцией; в) по нагрузке и с коррекцией

Для этого также необходимо выбрать коэффициенты передач датчиков токов якорей двигателей, обратнопропорциональные мощностям электродвигателей. Другие показатели качества системы привода близки к оптимизированным, в частности: а) быстродействие системы составляет  $t_{\sigma} = 1,5 \text{ сек.}$ ; б) перерегулирование  $\sigma = 43\%$ ; в) динамическое падение скорости  $\Delta v_{\text{дин}} = 0,0075$  без статической ошибки.

### Выводы

Для современных прессов бумагоделательных машин построена система управления двухдвигательным электроприводом с одним регулятором скорости и индивидуальными регуляторами якорных токов и токов возбуждений двигателей при их питании от общего преобразователя всей бумагомашины, которая обеспечивает автоматическое распределение нагрузки между двигателями.

Составлена детализированная структурная схема системы двухдвигательного

электропривода с регулированием возбуждений двигателей при учете упругостей механических передач.

Даны рекомендации для определения оптимальных параметров регуляторов и датчиков токов предложенной системы, а также корректирующей гибкой обратной связи по скорости главного двигателя привода, обеспечивающие динамические характеристики привода, близкие к оптимизированным.

#### Список использованной литературы

1. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. СПб : Энергоатомиздат, 1992. – 290 с.

2. Герасимьяк Р. П. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением / Р. П. Герасимьяк. – К. : Техника, 1984. – 300 с.

3. Дочвири Дж. Н. Оптимизация динамики тиристорного электропривода с упругим звеном по критериям Кальмана-Фробенюса / Дж. Н. Дочвири // *Электротехника*. – М. : – 2004. – № 5. – С. 6 – 13.

4. 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.

5. Дочвири Дж. Н. Моделирование динамических режимов двухдвигательного электропривода с учётом упругостей и зазоров механических передач / Дж. Н. Дочвири, И. Дж. Дочвири // *Электротехнические и компьютерные системы*. – Одесса : – 2012. – № 05 (81). – С. 43 – 49.

6. Дочвири Дж. Н. Динамика систем управления тиристорных электроприводов с регулированием возбуждения электродвигателя / Дж. Н. Дочвири, И. Дж. Дочвири, Н. Дж. Берадзе // *Технічна електродинаміка*. К. : – 2005. – № 6. – С. 30 – 35.

7. Квартальнов Б. В. Динамика электроприводов с упругими связями / Б. В. Квартальнов. – М. : Энергия, 1965. – 240 с.

8. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 500 с.

9. Leonhard W., (2001), *Control of Electrical Drives*, Springer, Berlin, 460 p.

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

Получено 07.10.2014

#### References

1. Bortsov Yu.A., and Sokolovskii G.G. *Avtomatizirovannyi elektroprivod s uprugimi svyazyami* [Automatized Electrical Drives with Elastic Connections], (1992), *Energoatomizdat Publ*, Saint-Petersburg, Russian Federation, 290 p. (In Russian).

2. Gerasimyak R.P. *Asinkhronnyi elektroprivod s tiristornym upravleniem* [Asynchronous Thyristor Electrical Drives], (1984), *Tekhnika Publ*, Kiev, Ukraine, 300 p. (In Russian).

3. Dochviri J. *Optimizatsiya dinamiki tiristorного elektroprivoda s uprugim zvenom po kriteriyam Kal'mana-Froben'yusa* [Optimizing the Dynamics of a Thyristor Electric Drive with an Elastic Section using Kalman-Frobenius Criteria], (2004), *Electrotekhnika Publ.*, Moscow, Russian Federation, No. 5, pp. 6 – 13 (In Russian).

4. Dochviri J. *Optimizatsiya perekhodnykh protsessov mnogodvigatel'nykh tiristornykh elektroprivodov s uprugimi svyazyami dlya pressovykh mekhanizmov nepreryvnykh tekhnologicheskikh mashin* [The Optimization of Transients in Multimotor Thyristor Electrical Drives with elastic Links for the Press Mechanisms of Continuous Technological Machines], (2006), *Electrichestvo Publ.*, Moscow, Russian Federation, No. 2, pp. 34 – 42 (In Russian).



5. Dochviri J., Dochviri I. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov dvukhdvigatel'nogo elektroprivoda s uchetom uprugostei i zazorov mekhanicheskikh peredach [Modeling of Dynamical Rejimes of two-motor Electrical Drives with Elastcietes and Gaps of the Mechanical Tansducers], (2012), *Journal Electrotechnic and Computer Systems Publ.*, Odesa, Ukraine, No. 5 (81), pp. 43 – 49 (In Russian).



Дочвири  
Джумбер Николаевич,  
д-р техн. наук, профессор  
департамента «Электроэнергетики» Грузинского техн. ун-та.  
Грузия, 0175, г. Тбилиси,  
ул. Костава 77, ГТУ  
E-mail:  
Jumer\_Dochviri@yahoo.com

6. Dochviri J., Dochviri I., Beradze N. Dinamika sistem upravleniya tiristornykh elektroprivodov s regulirovaniem vozbuzhdeniya elektrodvigatelya [Dynamics of Control Systems of Thyristor Electric Drives with an Electric Motor Excitation Control, (2005), *Technical Electrodynamics Publ.* Kiev, Ukraine, No. 6, pp. 30 – 35 (In Russian).



Берадзе  
Нана Джимшеровна  
канд. техн. наук, ассоциированный профессор  
департамента «Электротехники и электроники» Грузинского техн. ун-та.  
Грузия, 0175, г. Тбилиси,  
ул. Костава 77, ГТУ.  
E-mail:  
Beradzenana@gmail.com

7. Kvartalnov B.V. Dinamika elektroprivodov s uprugimi svyazyami [Dynamics of Electrical Drives with Elastic Connections], (1965), *Energia Publ.*, Moscow, Russian Federation, 240 p. (In Russian).

8. Kluchev V.I. Teoriya elektroprivoda [Theory of Eelectrical drives], (2001), *Energoatomizdat Publ.*, Moscow, Russian Federation, 500 p. (In Russian).

9. Leonhard W., (2001), Control of Electrical Drives, *Springer*, Berlin, 460 p.

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