

УДК 621.313.16

**М. В. Печеник, С. О. Бур'ян**, кандидати техн. наук,  
**Л. М. Наумчук**

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ КОНВЕЄРА ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ ТЯГОВОГО ОРГАНУ

**Анотація.** З метою стабілізації об'ємного завантаження стрічки конвеєра запропонована структура замкнутої системи регулювання лінійної швидкості тягового органу у функції вантажопотоку. На підставі отриманої моделі електромеханічної системи конвеєрної установки, представленої у вигляді чотирьохмасової структурної схеми, наведені результати дослідження енергетичних характеристик електроприводу.

**Ключові слова:** стрічковий конвеєр, регулювання, тяговий орган, втрати енергії, розрахункова схема, навантаження, асинхронний електропривод, частотне керування, електромеханічна система, оптимальний регулятор, перехідні процеси, енергетична ефективність

**N. Pechenyk, PhD., S. Buryan, PhD.,**  
**L. Naumchuk**

### RESEARCH OF ENERGY LOSSES IN CONVEYOR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH TRACTION BODY SPEED CONTROL

**Annotation.** In order to stabilize volume loading of belt conveyor proposed structure of a closed system of regulation linear velocity a pulling unit as a function of cargo flow. Based on obtained model electromechanical system pipeline installation as four-mass block diagram shows the results of the study of the electric power characteristics.

**Keywords:** belt conveyor, control, traction body, loss of energy, design scheme, load, asynchronous electric drive, frequency control, electromechanical system, optimal regulator, transients, energy efficiency

**H. V. Pechenyk, S. A. Buryan**, кандидати техн. наук,  
**Л. Н. Наумчук**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОНВЕЙЕРА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ ТЯГОВОГО ОРГАНА

**Аннотация.** С целью стабилизации объемной загрузки ленты конвейера предложена структура замкнутой системы регулирования линейной скорости тягового органа в функции грузопотока. На основании полученной модели электромеханической системы конвейерной установки, представленной в виде четырехмассовой структурной схемы, приведены результаты исследования энергетических характеристик электропривода.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, регулирование, тяговый орган, потери энергии, расчетная схема, нагрузка, асинхронный электропривод, частотное управление, электромеханическая система, оптимальный регулятор, переходные процессы, энергетическая эффективность

**Вступ.** При аналізі режимів роботи стрічкових конвеєрів та оцінці їх енергетичної ефективності важливим моментом є розгляд даного об'єкту як єдиної багатомасової електромеханічної системи. Такий підхід дозволяє врахувати вплив механічної частини транспортуючого пристрою на енергетичні характеристики електроприводу. В реальних конвеєрних системах, а особливо в магістральних конвеєрах, надходження вантажу на тяговий орган є досить нерівномірним, в результаті чого момент навантаження на привідному електродвигуні може змінюватися в межах від  $0,5 \cdot M_n$  до  $1,2 \cdot M_n$ .

Попередні роботи були присвячені дослідженню енергоефективних режимів роботи конвеєрів [1, 2, 3] та не враховували безперервний режим зміни їх навантаження. Врахування такого режиму навантаження дає можливість визначати енергетичні характеристики електромеханічної частини системи в реальних технологічних умовах.

Одним із ефективних методів зниження енергетичних втрат є забезпечення моменту навантаження електродвигуна близьким до номінального. Врахо-

вуючи, що опори механічної частини конвеєра (сили тертя, маси рухомих частин) постійні, сили опору конвеєрного ставу і стрічки розподілені рівномірно вздовж траси, то забезпечення постійного об'ємного завантаження конвеєра за рахунок регулювання лінійної швидкості тягового органу дозволить отримати ККД системи близьке до номінального при незмінному моменті на валу електродвигуна. Разом з тим зменшення швидкості потребує підтримання постійного магнітного потоку електродвигуна. Тому необхідно забезпечити регулювання напруги в залежності від частоти статора. Також слід врахувати, що параметри вантажу в процесі роботи змінюються (різна вологість, кусковатість, наявність домішок), як наслідок виникають коливання моменту. Тому для досягнення максимального рівня зниження втрат енергії слід додатково використовувати оптимальний по енергетичній ефективності закон керування напругою статора.

Такий підхід до побудови систем автоматичного керування є досить актуальним і дозволить значно зменшити втрати енергії в електромеханічній системі в цілому.

© Печеник М.В., Бур'ян С.О., Наумчук Л.М., 2014

**Мета роботи.** Провести дослідження характеру зміни втрат енергії в електромеханічній системі стрічкового конвеєра при стабілізації його об'ємної продуктивності за рахунок регулювання лінійної швидкості тягового органу та при використанні оптимального за енергетичною ефективністю регулятора напруги статора приводного асинхронного двигуна.

**Матеріал і результати дослідження**

Для проведення досліджень енергетичних параметрів установки стрічкового конвеєра розроблена структура електромеханічної системи автоматичного керування, загальний вигляд якої представлено на рис. 1.

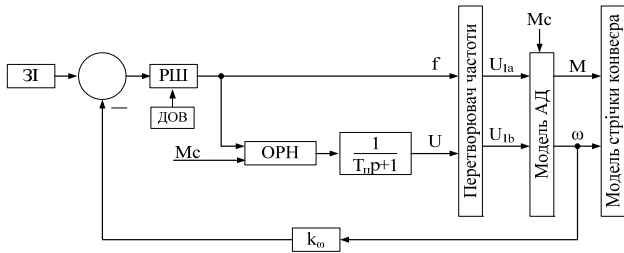


Рис. 1. Структура системи керування для проведення досліджень параметрів електромеханічної системи

На рис. 1 прийняті наступні позначення: ЗІ – датчик інтенсивності, який використовується для зміни сигналу заданої швидкості при пуску конвеєра і максимального сигналу при номінальній швидкості тягового органу; РШ – регулятор швидкості (ПІ – регулятор); ДОВ – датчик об'єму вантажу на тяговому органі в районі навантажувального бункера, що контролює потрібний об'єм вантажу на конвеєрній стрічці; ОРН – оптимальний регулятор напруги, який забезпечує мінімізацію втрат енергії в статичному режимі [4].

Математичні моделі перетворювача частоти і асинхронного двигуна отримані відомими методами [5, 6].

Для отримання більш повної картини, яка відбувається в механічній частині конвеєра процесів, особливо у її пружно-в'язких елементах, при побудові математичної моделі, використана 4-х масова система механічної частини установки.

При побудові розрахункової схеми введений ряд обмежень: траса конвеєра горизонтальна або з незмінним кутом нахилу; відсутні проковзування стрічки відносно барабану і опорних елементів; коефіцієнти опору руху вантажної і холостої віток постійні [7]. Розрахункова схема приведена на рис. 2.

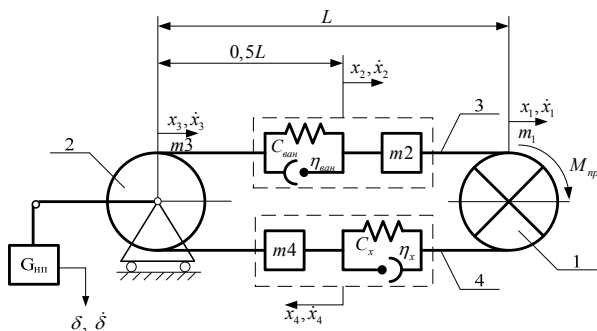


Рис. 2. Розрахункова схема конвеєра

На розрахунковій схемі конвеєра прийняті наступні позначення: 1, 2 – приводний і натяжний барабани; 3, 4 – вантажна і холоста вітки; m1, m2, m3, m4 – положення чотирьох мас;  $G_{мп}$  – вага натяжного пристрою;  $M_{мп}$  – момент двигуна, приведений до валу приводного барабана; L – довжина конвеєрної стрічки;  $\delta, \dot{\delta}$  – положення і швидкість переміщення натяжного вантажу;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – переміщення чотирьох мас;  $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$  – швидкості чотирьох мас;  $C_{ван}, C_x$  – коефіцієнти жорсткості вантажної і холостої віток;  $\eta_{ван}, \eta_x$  – коефіцієнти в'язкого тертя вантажної і холостої віток.

Розподілена маса стрічки з вантажем представлена трьома масами на вантажній вітці та однією масою на порожній вітці, це розбиття має задовільну точність при вирішенні технічних завдань.

В якості узагальнених змінних математичної моделі руху конвеєра прийняті координати положення чотирьох мас  $m_1, m_2, m_3, m_4$ , їх швидкості  $\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3, \dot{X}_4$ , переміщення  $X_1, X_2, X_3, X_4$ , а також, положення і швидкість переміщення натяжного вантажу  $\delta, \dot{\delta}$ .

Рух конвеєра описується на основі рівняння Лагранжа 2-го роду наступними десятьма координатами стану [8]:

$$X = (X_1, X_2, X_3, X_4, \dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3, \dot{X}_4, \delta, \dot{\delta})^T \quad (1)$$

Для отримання загальної математичної моделі використовується величина кінетичної енергії, яка включає кінетичну енергію замкнутого контуру стрічки ( $T_k$ ), приводного ( $T_n$ ), натяжного ( $T_H$ ) пристроїв:

$$T_k = G_{ван} \cdot l ((\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_2 + \dot{X}_2^2) + (\dot{X}_2^2 + \dot{X}_2 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2)) / 6g + G_{нор} \cdot l ((\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_4 + \dot{X}_4^2) + (\dot{X}_4^2 + \dot{X}_4 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2)) / 6g, \quad (2)$$

де  $G_{ван}$ ,  $G_{нор}$  – погонна вага завантаженої і порожньої віток тягового органу; l – довжина стрічки конвеєра;

g – прискорення вільного падіння.

$$T_n = m_{np} \cdot \dot{X}_1^2 / 2, \quad T_H = G_{мп} \cdot \dot{\delta}^2 / 2,$$

де  $m_{np}$  – маси частин приводу, які обертаються;  $G_{мп}$ ,  $\dot{\delta}$  – вага та швидкість переміщення натяжного пристрою.

Потенціальна енергія пружної деформації системи складається з енергії конвеєрної стрічки ( $\Pi_k$ ) та канатів натяжного пристрою ( $\Pi_n$ ) і записується наступним чином:

$$\Pi_k = (X_1 - X_2)^2 C_1 / 2 + (X_2 - X_3)^2 C_2 / 2 + (X_4 - X_1)^2 C_1' / 2 + (X_3 - X_4)^2 C_2' / 2, \quad (3)$$

де  $C_1, C_2, C_1', C_2'$  – коефіцієнти жорсткості ділянок конвеєра. Припустимо, що  $C_1 = C_2 = C_1' = C_2' = C$ , отримаємо

$$\Pi_k = (X_1 - X_2)^2 C / 2 + (X_2 - X_3)^2 C / 2 + (X_4 - X_1)^2 C / 2 + (X_3 - X_4)^2 C / 2, \quad (4)$$

де  $C$  – коефіцієнти жорсткості кожної ділянки конвеєра. Отже, потенціальна енергія канатів натяжного пристрою матиме вигляд

$$P_n = 0.5 \left( \frac{(X_3 - X_4)}{2 - \delta} \right)^2 C_k, \quad (5)$$

де  $C_k$  – коефіцієнт жорсткості канату.

Потенціальна енергія положення натяжного вантажу

$$P_B = G_{nn} \delta. \quad (6)$$

Після проведених перетворень, отримаємо математичний опис руху тягового органу конвеєра, який складається з 5-ти нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку.

$$(2m_{ван.} + 2m_{нор.} + 2m_{пр.})\ddot{X}_1 + m_{ван.}\ddot{X}_2 + m_{нор.}\ddot{X}_4 + 2CX_1 - CX_2 - CX_4 + (0.5G_{ван.}lw + 0.5G_{нор.}lw)\text{sgn} \dot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_1 - \eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_4 = M_{ПП} \text{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1) / R_\sigma,$$

$$m_{ван.}\ddot{X}_1 + 4m_{ван.}\ddot{X}_2 + m_{ван.}\ddot{X}_3 - CX_1 + 2CX_2 - CX_3 + G_{ван.}lw\text{sgn} \dot{X}_2 - \eta\dot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_3 = 0, \quad (7)$$

$$m_{ван.}\ddot{X}_2 + (2m_{ван.} + 2m_{нор.})\ddot{X}_3 + m_{нор.}\ddot{X}_4 - CX_2 + (2C + 0.25C_k)X_3 - (C + 0.25C_k)X_4 - 0.5C_k\delta + (0.5G_{ван.}lw + 0.5G_{нор.}lw)\text{sgn} \dot{X}_3 + 2\eta\dot{X}_3 - \eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_4 = 0,$$

$$m_{нор.}\ddot{X}_1 + 4m_{нор.}\ddot{X}_4 + m_{нор.}\ddot{X}_3 - CX_1 + (C + 0.25C_k)X_4 - (2C + 0.25C_k)X_3 + 0.5C_k\delta + G_{нор.}lw\text{sgn} \dot{X}_4 - \eta\dot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_4 - \eta\dot{X}_3 = 0,$$

$$G_{nn}\ddot{\delta} / g - 0.5(X_4 - X_3 + \delta)C_k + G_{nn.} + G_{nn.}f \text{sgn} \dot{\delta} = 0,$$

де  $w$  – коефіцієнт опору руху стрічки конвеєра;  $m_2 = G_{сп}l/12g$ ,  $m_n = G_{нор}l/12g$  – маси вантажної та порожньої віток конвеєра;  $M_{ПП}$  – момент двигуна, що приведений до валу барабану.

Модель руху стрічки конвеєра в просторі стану зручно представити у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь

$$\dot{X} = \tilde{A} \cdot X + \tilde{B}_1 \cdot M_{np} + \tilde{B}_2 \cdot \text{sgn} X + \tilde{B}_3 \cdot G_{nn}. \quad (8)$$

Введемо позначення для керуючих впливів:  $U_1 = M_{np}$  – момент, який створюється приводом;  $U_2 = \text{sgn} X$  – сили опору руху зосереджених мас стрічки;  $U_3 = G_{nn}$  – вага натяжного пристрою.

Отже, модель стрічки конвеєра представимо у вигляді наступної векторно-матричної форми

$$\dot{X} = \tilde{A} \cdot X + \tilde{B}_1 \cdot U_1 + \tilde{B}_2 \cdot U_2 + \tilde{B}_3 \cdot U_3, \quad (9)$$

де  $\tilde{A}$  – матриця стану системи, являє собою блочну матрицю, яка містить в собі матриці  $M^T N$  та  $M^T C$ ;  $\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3$  – блочні матриці керування. Матриця  $\tilde{B}_1$  включає в себе  $M^T P$ ,  $\tilde{B}_2$  містить  $M^T S$ ,  $\tilde{B}_3$  має в своєму складі  $M^T G_{nn}$ .

Для дослідження вибрано типовий стрічковий конвеєр 1Л1000Д [6, 7] довжиною 1000 м з електро-

двигуном потужністю 160 кВт. Результати досліджень приведені на рис. 3 – 5.

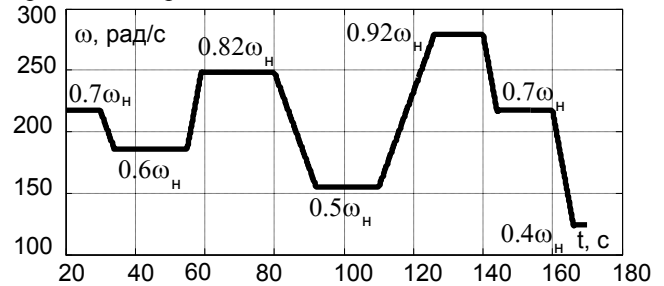


Рис. 3. Графік зміни швидкості при стабілізації об'ємного завантаження конвеєра



Рис. 4. Графіки ККД при регулюванні швидкості

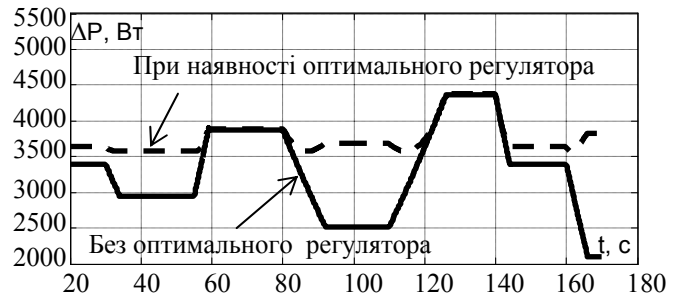


Рис. 5. Графіки втрат при регулюванні швидкості

Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що при стабілізації об'ємного завантаження конвеєра за рахунок регулювання швидкості в діапазоні від  $0,4\omega_n$  до  $0,7\omega_n$ , а також при використанні оптимального регулятора напруги можливо зменшити втрати енергії в електромеханічній системі від 3,8% до 29,1%.

**Висновки.** Застосування замкнутої системи регулювання швидкості дозволяє отримати момент навантаження, близький до номінального. Застосування додатково оптимального закону регулювання напругою дає можливість значно знизити втрати електроенергії в електромеханічній системі стрічкового конвеєра до 29%. Крім того стабілізація завантаження тягового органу значно покращує експлуатаційні характеристики конвеєра в цілому.

#### Список використаної літератури

1. Печеник М. В. Питання підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів / М. В. Печеник, О. М. Суходоля // Наукові вісті НТУУ "КІП". – 1998. – Вип. 2. – С. 29 – 32.
2. Печеник М. В. Особливості підвищення енергетичної ефективності електромеханічної систем конвеєра

/ М. В.Печеник, С. О. Бур'ян, А. О. Горбатовський // Вісник НТУУ «ХПІ», Серія : Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика. – Харків : – 2013. – № 36. – С. 382 – 384.

3. Leonhard W., (1996), Control of Electrical Drives. Springer, Verlag, Berlin, 420 p.

4. Печеник М. В. Розробка моделі електромеханічної системи стрічкового конвеєра з врахуванням енергозберігаючих режимів роботи електроприводу/ М. В. Печеник, О. А. Зайченко // Наукові вісті НТУУ «ХПІ». – 2007.–№ 1.–С. 115 – 120.

5. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов / В. И. Ключев, В. М. Терехов.– М. : – Энергия. –1980. – 360 с.

6. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М. : – Энергоатомиздат. – 1986.–360 с.

7. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев – 2-изд., перераб. и доп.– М. : Машиностроение. – 1987. –336 с.

8. Павловський М. А. Теоретична механіка: підручник / М. А. Павловський – К. : Техніка.–2002. – 512 с.

9. Каталог заводов – Конвейеры ленточные шахтные участковые 1Л1000Д. [Електронний ресурс]: <http://www.specserver.com/rus/catalog.asp?catalogID=119&groupID=0&catalogGroupID=905&catalogFieldID=4559> (дата доступа 12.10.2011).

10. Конвейеры ленточные шахтные участковые 1Л800Д, 1Л1000Д [Електронний ресурс]: Режим доступа [http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=570:gimli&catid=111:2009-05-31-20-13-06](http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=570:gimli&catid=111:2009-05-31-20-13-06). – Дата доступа (12.10.2011).

Отримано 04.07.2014

#### References

1. Pechenyk M.V., and Sukhodolya O.M. Pytannya pidvyshchennya enerhetychnoyi efektyvnosti asynkhronnykh elektropyvodiv [Questions of Energy Efficiency of Induction Motors], (1998), *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, Vyp. 2, pp. 29 – 32 (In Ukrainian).

2. Pechenyk M.V., Bur"yan S.O., and Horbatovs'kyu A.O. Osoblyvosti pidvyshchennya enerhetychnoyi efektyvnosti elektromekhanichnoyi system konveyera [Features of Electromechanical Energy Efficiency of the Assembly Line], (2013), *Visnyk NTUU "KhPI"*, *Seriya: Problemy Avtomatyzovanoho Elektropyvoda Teoriya i Praktyka*, Kharkiv, Ukraine, No. 36, pp. 382 – 384 (In Ukrainian), url: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/5194/1/visnyk\\_HPI\\_2013\\_36\\_Pechenyk\\_Osoblyvosti\\_%20pidvyshchennia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/5194/1/visnyk_HPI_2013_36_Pechenyk_Osoblyvosti_%20pidvyshchennia.pdf).

3. Leonhard W. (1996). Control of Electrical Drives. Springer. Verlag, Berlin, 420 p. (In English), url: [http://books.google.com.ua/books/about/Control\\_of\\_Electrical\\_Drives.html?id=pdsF210k5ikC&redir\\_esc=y](http://books.google.com.ua/books/about/Control_of_Electrical_Drives.html?id=pdsF210k5ikC&redir_esc=y).

4. Pechenyk M.V., and Zaychenko O.A. Rozrobka modeli elektromekha-nichnoyi systemy strichkovoho konveyera z vrakhuvannyam enerhozberihayuchykh rezhymiv roboty elektropyvodu [Development of Models of Electromechanical Systems Conveyor belt based Electric

Power Saving Modes], (2007), *Naukovi Visti NTUU "KPI"*.– No.1, pp. 115 – 120 (In Ukrainian).

5. Klyuchev V.Y., and Terekhov V.M. Elektro-pryvod y avtomatyzatsyya obshchepromyshlennykh mekhanyzmov: Uchebnyk dlya vuzov [General Industrial Electric Drive and Automation Mechanisms: Textbook for Universities], (1980), Moscow, Russian Federation, *Enerhyya*, 360 p. (In Russian).

6. Klyuchev V.Y. Teoryya elektropyvoda. [Theory of Electric Drive], (1986), Moscow, Russian Federation, *Enerhoatomyzdat*, 360 p. (In Russian).

7. Shakhmeyster L.H., and Dmytryev V.H. Teoryya y raschet lentochnykh konveyerov [Theory and Calculation of belt Conveyors], (1987), *2-eyzd., Pererab. i Dop.*, Moscow, Russian Federation, *Mashynostroenye*, 336 p. (In Russian).

8. Pavlov's'kyu M.A. Teoretychna mekhanika: Pid-ruchnyk [Engineering Mechanics: Textbook], (2002), Kiev, Ukraine, *Tekhnika*, 512 p. (In Ukrainian).

9. Katalog zavodov – Konveyery lentochnye shakhtnye uchastkovye 1L1000D. [Elektronnyy resurs]: <http://www.specserver.com/rus/catalog.asp?catalogID=119&groupID=0&catalogGroupID=905&catalogFieldID=4559> (accessed 12.10.2011).

10. Konveyery lentochnye shakhtnye uchastkovye 1L800D, 1L1000D [Elektronnyy resurs]: Available at [http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=570:gimli&catid=111:2009-05-31-20-13-06](http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=570:gimli&catid=111:2009-05-31-20-13-06) (accessed 12.10.2011).



Печеник  
Микола Валентинович, канд.  
техн. наук, доц. каф. автоматиза-  
ції електромеханічних систем та  
електроприводу Нац. технічного  
ун-ту України «Київський полі-  
технічний ін-т» (03056, м. Київ,  
проспект Перемоги, 37),  
м/т 067-783-10-11.  
E-mail: pechenikMV@ukr.net.



Бур'ян  
Сергій Олександрович,  
канд. техн. наук, ст. викладач каф.  
автоматизації електромеханічних  
систем та електроприводу Нац.  
технічного ун-ту України «Київ-  
ський політехнічний ін-т» (03056,  
м. Київ, проспект Перемоги, 37),  
м/т 097-639-92-79.  
E-mail: sburyan@rambler.ru



Наумчук  
Людмила Миколаївна, студентка  
6-го курсу каф. автоматизації  
електромеханічних систем та елек-  
троприводу Нац. технічного ун-  
ту України «Київський політехні-  
чний ін-т», (03056, м. Київ, про-  
спект Перемоги, 37),  
м/т 093-552-98-00.  
E-mail: ansuz030690@ukr.net.