

УДК 681.532.55 (045)

**В. В. Осадчий, Е. С. Назарова**, кандидаты техн. наук,  
**Е. В. Васильева, В. А. Новомлинский, А. А. Ткачев**

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТЬЮ ДЕБАЛАНСА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОКРУГ ПОДВИЖНОЙ ОСИ

***Аннотация.** Предложена релейная системы управления угловой скоростью, обеспечивающая медленное изменение углового положения дебаланса относительно колебаний его оси. Разработана соответствующая лабораторному стенду имитационная модель и экспериментально подтверждена её адекватность. Указанная модель может использоваться при синтезе системы управления групповым виброприводом.*

***Ключевые слова:** вибропривод, дебаланс, угловая скорость, угловое положение, релейный регулятор, микропроцессор, система управления*

**V. V. Osadchiy, PhD., E. S. Nazarova, PhD.,**  
**E. V. Vasiljeva, V. A. Novomlinskiy, A. A. Tkachev**

### CONTROL SYSTEM OF UNBALANCE ANGULAR VELOCITY ROTATING AROUND OF THE MOVABLE AXIS

***Abstract.** Proposed relay control system angular velocity, providing a slow change of the angular position of the unbalance vibrations relative to its axis. Was developed the simulation model, which appropriates to laboratory bench, and experimentally confirmed its adequacy. This model can be used in the synthesis of control systems of group vibratory drive.*

***Keywords:** vibratory drive, unbalance, angular velocity, angular position, relay regulator, microprocessor, control system*

**В. В. Осадчий, О. С. Назарова**, кандидаты техн. наук,  
**Е. В. Васильева, В. О. Новомлинский, О. О. Ткачев**

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КУТОВОЮ ШВИДКІСТЮ ДЕБАЛАНСА, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ НАВКОЛО РУХОМОЇ ОСІ

***Анотація.** Запропоновано релейну систему керування кутовою швидкістю, яка забезпечує повільну зміну кутového положення дебаланса відносно коливань його осі. Розроблено відповідну лабораторному стенду імітаційну модель і експериментально підтверджено її адекватність. Вказана модель може використовуватись при синтезі системи керування груповим віброприводом.*

***Ключові слова:** вібропривод, дебаланс, кутова швидкість, кутове положення, релейний регулятор, мікропроцесор, система керування*

**Введение.** Замена применяемых в металлургии в качестве приводов вибрационных питателей электромагнитных возбuditелей более дешевыми и менее материалоемкими дебалансными вибровозбудителями сдерживается невозможностью регулирования амплитуды возмущающей силы одиночных вибровозбудителей в процессе работы [1 – 4].

Одним из решений является система управления многодвигательным дебалансным виброприводом [5], задачей которой является обеспечение синхронного вращения дебалансов с заданным фазовым сдвигом.

Наличие различного рода дестабилизирующих факторов и высокие требования по точности регулирования являются предпосылкой использования в системе управления угловым положением дебаланса, ось вращения которого находится на подвижной платформе [6], релейных регуляторов [7 – 8]. Поэтому разработка релейной системы управления угловой скоростью, обеспечивающей высокую точность в

условиях действия вибрационного момента и являющуюся внутренним контуром регулирования системы управления угловым положением дебаланса, является актуальной задачей.

**Цель.** Разработка релейной системы автоматического управления (РСАУ), обеспечивающей заданную, близкую к синхронной с колебаниями платформы, угловую скорость дебаланса во всём диапазоне фазового сдвига между колебательным движением платформы и вращательным движением дебаланса. В соответствии с указанной целью требуется решение задач по созданию лабораторного стенда, имитационной модели и программного обеспечения; экспериментальному подтверждению работоспособности РСАУ угловой скоростью; оценке адекватности предлагаемой модели по результатам математического моделирования и физического эксперимента.

**Материалы и результаты исследований.** В установленном режиме регулирования углового положения дебаланса с учетом уравнения вращательного движения [5], [9] и среднего за период вибрационного момента [6] средний ток двигателя определяется выражением

© Осадчий В.В., Назарова Е.С., Васильева Е.В.,  
Новомлинский В.А., Ткачев А.А., 2014

$$I_{\text{дв.ср.}} = \frac{1}{K} \cdot (T_e \omega_c + \frac{1}{2} m_{\text{деб}} \cdot \omega_c^2 \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \sin \Delta \phi), \quad (1)$$

где  $K$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $T_e$  – коэффициент вязкого трения;  $\omega_c$  – синхронная угловая скорость дебаланса и кривошипа, обеспечивающего колебания платформы;  $r$  – радиус кривошипа;  $m_{\text{деб}}$  – масса дебаланса;  $\varepsilon$  – эксцентриситет,  $\Delta \phi$  – рассогласование углового положения дебаланса и кривошипа. Из выражения (1) следует, что при условии

$$\omega_c > \frac{2 \cdot T_e}{m_{\text{деб}} \cdot \varepsilon \cdot r} \quad (2)$$

зависимость  $I_{\text{дв.ср.}} = f(\Delta \phi)$  является знакопеременной. Таким образом, при условии (2) в зависимости от текущего угла рассогласования  $\Delta \phi$  система управления угловой скоростью дебаланса должна обеспечивать как двигательный, так и тормозной режим. По мнению авторов, обеспечение режима, в котором частота вращения дебаланса поддерживается близкой, но не равной частоте вращения кривошипа ( $\pm 0,3 \dots 0,5$  об/с), является основанием для использования системы управления угловой скоростью в качестве внутреннего контура регулирования в системе управления угловым положением дебаланса. В указанном режиме «медленное» изменение углового рассогласования между дебалансом и кривошипом практически исключает прохождение точки, соответствующей максимальному значению вибрационного момента, за счёт накопленной кинетической энергии.

С целью проведения исследований по разработке РСАУ рассогласованием углового положения вращающихся дебалансов вибровозбудителей создан лабораторный стенд, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

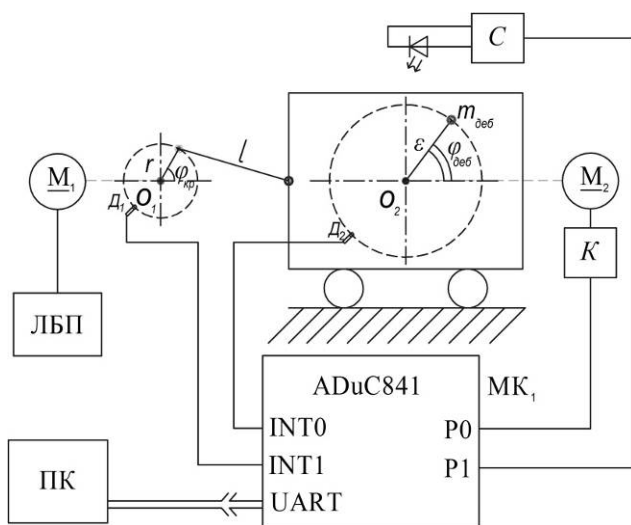


Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда

Кинематическая схема и математическое описание механической части стенда приведены в [6].

В состав лабораторного стенда входят: ЛБП – лабораторный блок питания Б5-47;  $M_1$  – двигатель кривошипа;  $M_2$  – двигатель дебаланса;  $D_1, D_2$  – датчики поворота кривошипа и дебаланса на основе кодировочного диска с пропущенным зубцом [10];  $MK_1$  – микроконтроллер ADuC841; С – стробоскоп; К – силовой коммутатор двигателя дебаланса; ПК – персональный компьютер для разработки прикладного ПО и программирования микроконтроллера.

Среди особенностей стенда следует выделить наличие стробоскопа, управляемого микроконтроллером. Освещая с помощью стробоскопа дебаланс в моменты идентификации пропущенного зубца кодировочного диска кривошипа можно визуально наблюдать угловое рассогласование дебаланса и кривошипа, что позволяет непосредственно в процессе работы системы оценивать её динамические и точностные характеристики, не производя специальных измерений.

Процессы в РСАУ угловой скоростью дебаланса, находящегося на подвижной платформе, описываются системой (3)

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{кр} = \int \omega_{кр} dt; \\ x_{пл} = r \cdot \cos \phi_{кр}; \\ J_{\text{деб}} \ddot{\phi}_{\text{деб}} = I_{\text{дв}} K - T_e \dot{\phi}_{\text{деб}} + m_{\text{деб}} \varepsilon \cdot \ddot{x}_{пл} \sin \phi_{\text{деб}}; \\ I_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}} - K \cdot \dot{\phi}_{\text{деб}}}{R}; \\ U_{\text{дв}}(\delta \omega) = \begin{cases} +U_{\text{num}}, & \text{если } \delta \omega > 0; \\ 0, & \text{если } \delta \omega = 0; \\ -U_{\text{num}}, & \text{если } \delta \omega < 0; \end{cases} \\ \delta \omega = \dot{\phi}_{\text{деб}} - \omega_{\text{деб}}^* \end{cases} \quad (3)$$

где  $\phi_{кр}$  – угол поворота кривошипа,  $\omega_{кр}$  – угловая скорость кривошипа,  $x_{пл}$  – положение платформы,  $r$  – радиус кривошипа (0,85 мм),  $J_{\text{деб}}$  – момент инерции дебаланса ( $8,489 \cdot 10^{-6}$  кг·м<sup>2</sup>),  $\phi_{\text{деб}}$  – угол поворота дебаланса,  $I_{\text{дв}}$  – ток якоря двигателя,  $K$  – конструктивная постоянная двигателя ( $5,77 \cdot 10^{-3}$  В·с),  $T_e$  – коэффициент вязкого трения ( $9,36 \cdot 10^{-7}$  Н·м·с),  $m_{\text{деб}}$  – масса дебаланса ( $9,2 \cdot 10^{-3}$  кг),  $\varepsilon$  – эксцентриситет ( $7,3 \cdot 10^{-3}$  м),  $R$  – сопротивление цепи якоря (8 Ом),  $U_{\text{дв}}$  – напряжение двигателя,  $U_{\text{num}}$  – напряжение питания (5В),  $\delta \omega$  – ошибка угловой скорости дебаланса,  $\omega_{\text{деб}}^*$  – заданная угловая скорость дебаланса. В скобках указаны измеренные значения или значения, полученные экспериментальным путем.

С целью подтверждения работоспособности контура скорости во всем диапазоне значений угла рассогласования были проведены идентичные по сути математический и физический эксперименты. При частоте вращения кривошипа 20 Гц задание

частоты вращения дебаланса устанавливалось равным 20,5 Гц.

В ходе физического эксперимента стрелочный миллиамперметр (мультиметр SUNWA YX360TRD, предел измерения 0,25 А), включенный в якорную цепь двигателя М<sub>2</sub>, и дебаланс освещались стробоскопом, который синхронизировался датчиком поворота кривошипа. В установившемся режиме положение дебаланса и соответствующее ему показание миллиамперметра 5 раз в секунду фиксировались фотоаппаратом. Возможность измерения отрицательных значений тока обеспечивалась дополнительным источником тока (100 мА), подключенным параллельно миллиамперметру. Графики тока двигателя и угла рассогласования представлены на рис. 2.

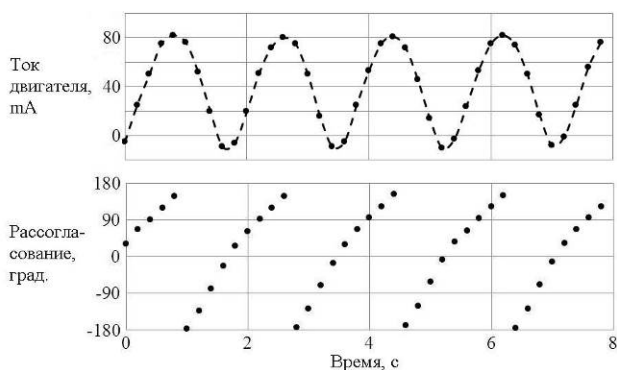


Рис. 2. Результаты физического эксперимента

Зависимость тока двигателя от рассогласования, полученная исключением времени из приведенных выше графиков, показана точками на рис. 3.

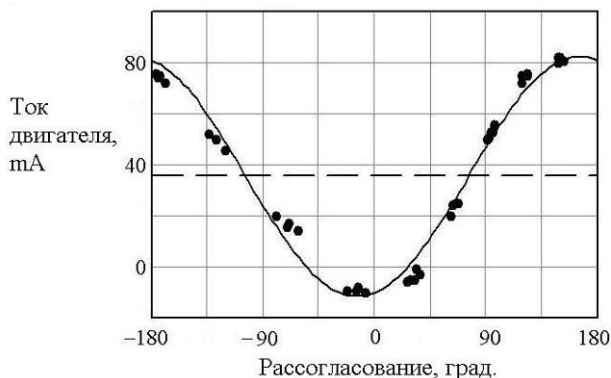


Рис. 3. Экспериментальная зависимость тока двигателя М2 от угла рассогласования

Аппроксимация экспериментальных данных выражением

$$I_{\text{дв}} = I_0 + A_I \cdot \sin(\Delta\varphi + \Theta), \quad (4)$$

представлена на рис.3 сплошной линией, там же пунктиром обозначена постоянная составляющая тока.

В (4):  $I_0$  – постоянная составляющая тока двигателя,  $A_I$  – амплитуда,  $\Delta\varphi$  – угловое рассогласование дебаланса и кривошипа,  $\Theta$  – фазовый сдвиг.

Математическое моделирование проводилось в соответствии с системой (3), при этом ток двигателя усреднялся аperiodическим звеном первого порядка с постоянной времени раной 0,26 с. Указанное значение принято на основании экспериментального определения постоянной времени мультиметра, используемого в физическом эксперименте. Угловое рассогласование дебаланса и кривошипа определялось по формуле

$$\Delta\phi = \arg(\cos(\phi_{\text{деб}} - \phi_{\text{кр}}) + i \cdot \sin(\phi_{\text{деб}} - \phi_{\text{кр}})). \quad (5)$$

Результаты моделирования приведены на рис.4. В установившемся режиме, как и в случае физического эксперимента, наблюдается периодическое изменение тока двигателя М<sub>2</sub>, причем с периодом, равным периоду изменения рассогласования.

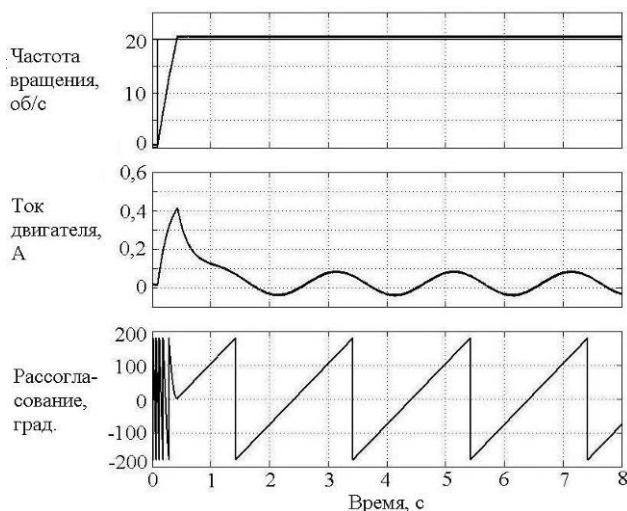


Рис. 4. Результаты математического моделирования

В табл. 1 приведены параметры аппроксимирующей функции (4) для трёх случаев: первый - расчет на основании выражения (1) при  $\omega_c = 62,8 \text{ с}^{-1}$ ; второй и третий – аппроксимация с помощью регрессии результатов соответственно математического моделирования и физического эксперимента.

#### 1. Параметры аппроксимирующей функции

| Метод определения | Параметры функции |            |                  |
|-------------------|-------------------|------------|------------------|
|                   | $I_0$ , mA        | $A_I$ , mA | $\Theta$ , град. |
| 1. Расчет         | 20,4              | 78,1       | 0                |
| 2. Моделирование  | 20,8              | 60,6       | -39,2            |
| 3. Эксперимент    | 35,4              | 47,0       | -75,6            |

Полученные зависимости графически представлены на рис. 5.

Амплитудные и фазовые отличия зависимости, полученной моделированием, относительно расчётной зависимости (1) обусловлены наличием аperiodического звена, используемого для выделения среднего значения из сигнала мгновенного значения тока двигателя.

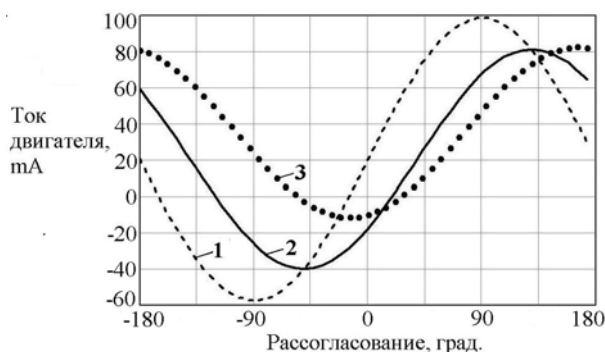


Рис. 5. Сравнение зависимостей

Увеличение постоянной составляющей тока при физическом эксперименте относительно результатов моделирования, возможно связано с неучтенными потерями энергии, вызванными вибрацией. Причиной более значительного ослабления амплитуды и увеличения фазового сдвига для физического эксперимента могут быть инерционности, не учтенные в математической модели.

**Выводы.** Релейная система управления угловой скоростью дебаланса, вращающегося вокруг подвижной оси, обеспечивает медленное изменение углового рассогласования, и может быть использована в качестве подчиненного контура системы управления угловым положением дебалансов группового вибропривода.

Близость результатов проведенных математического и физического экспериментов свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели релейной системы управления угловой скоростью и дает основания для использования указанной модели в дальнейших исследованиях по созданию регулируемого дебалансного вибропривода.

Количественные несоответствия параметров зависимостей, полученных экспериментально и моделированием, требуют дальнейших исследований в направлении поиска физической сути наблюдаемых явлений и уточнения математической модели дебалансного вибровозбудителя.

#### Список использованной литературы

1. Потураев В. Н. Вибрационные транспортирующие машины / В. Н. Потураев, В. П. Франчук, А. Г. Червоненко. – М. : Машиностроение, 1964. – 272 с.
2. Спивакоский А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А. О. Спивакоский, Н. Ф. Гончаревич. – М. : Машиностроение, 1972. – 328 с.
3. Сердюк Л. И. Основы теории, расчет и конструирование управляемых вибрационных машин с дебалансными возбудителями: автореф. дис. д-ра техн. наук / Л.И. Сердюк; ХПИ. – Харьков, 1991. – 48 с.
4. Чубик Р. В. Керовані вібраційні технологічні машини [Текст] / Р. В. Чубик, Л. В. Ярошенко – Вінниця : ВНАУ, 2011. – 355 с.
5. Осадчий В. В. Регульований електропривод дебалансного вібробудувача / В. В. Осадчий, І. В. Батраченко, Д. В. Микитюк // Електромеханічні і

енергозберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 194 – 197.

6. Осадчий В. В. Регулирование углового положения дебаланса, вращающегося вокруг подвижной оси / В. В. Осадчий // Спецвыпуск Вестника НТУ «ХПИ» – Харьков : ХПИ. – 2013. – № 36– С. 213 – 214.

7. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина – К : «ИСИМО», 1996. – 298 с.

8. Садовой А. В. Релейные системы оптимального управления электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина, А. Л. Дерез. – Днепро-дзержинск : «ДГТУ», 2011. – 337 с.

9. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем / И. И. Блехман. – М. : Наука, 1971. – 894 с.

10. Осадчий В. В. Программно-аппаратный комплекс определения рассогласования углового положения вращающихся дебалансов вибровозбудителей / В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, В. А. Новомлинский // Спец. выпуск Вестника «ХПИ», 2013. – № 36. – С. 211 – 212.

Получено 14.07.2014

#### References

1. Poturaev V.N., Franchuk V.P., and Chervonenko A.G. Vibrotsionnie transportiruyuschie mashini [Vibrational Transporting Machines]. (1964), Moscow, Russian Federation, *Mashinostroenie*, 272 p. (In Russian).
2. Spivakovskiy A.O., and Goncharevich N.F. Vibratsionnie konveyeri, pitateli i vspomogatelnie ustroystva [Vibrational Conveyors, Feeders and Assistive Devices], (1972), Moscow, Russian Federation, *Mashinostroenie*, 328 p. (In Russian).
3. Serdyuk L.I. Osnovi teorii, raschet i konstruirovaniye upravlyаемih vibratsionnih mashin s debalansnimy vzbuditelnyami [Fundamentals of the theory, Calculation and Design of Controlled Vibrating Machines with Unbalance Exciters], (1991), *Synopsis to Dissertation, Doctor of Technical Science, L.I. Serdyuk*, Kharkiv, Ukraine, KhPI, 48 p. (In Russian).
4. Chubik R.V., and Yaroshenko L.V. Kerovani vibratsiyni tehnologichni mashini [Controlled Vibrational Technological Machines], (2011), Vinnytsa, Ukraine, *VNAU*, 355 p. (In Ukrainian).
5. Osadchiy V.V., Batrachenko V.V., and Mikituk D.V. Reguljovaniy elektroprivoд debalansnogo vibrozbudzhuvacha [Regulated Electric Drive of the Unbalance Vibration Exciter], (2012), *Elektromehanichni i Energozberigayuchi Sistemi*, Kremenchug, Ukraine, *KrNU*, Vol. 3/2012(19), pp. 194 – 197 (In Ukrainian).
6. Osadchiy V.V. Regulirovaniye ugliovogo polozheniya debalansa, vraschayushegosya vokrug nepodvizhnoy osi [Regulation of the Angular Position of the Unbalance of the Rotating Around Movable axis], (2013), *Spetsvipusk Vestnika NTU "HPI"*, Kharkiv, Ukraine, *KhPI*, Vol.36, pp. 213 – 214 (In Russian).

7. Sadovoy A.V., Suhinin B.V., and Sohina U.V. *Systemi optimalnogoupravleniya pretsezionnimi elektroprivodami* [Systems of Optimal Control of Precision Electric Drives], (1996), Kiev, Ukraine, *ISIMO*, 298 p. (In Russian).

8. Sadovoy A.V., Suhinin B.V., Sohina U.V., and Derets A.L. *Releynie sistemi optimalnogo upravleniya elektroprivodami* [Relay System of Optimal Control of Electric Drives], (2011), Dneprodzerzhinsk, Ukraine, *DGTU*, 227 p. (In Russian).

9. Blehman I.I. *Sinhronizatsiya dinamicheskikh system* [Synchronization of Dynamical Systems], (1971), Moscow, Russian Federation, *Nauka*, 894 p. (In Russian).

10. Osadchiy V.V., Nazarova E.S., and Novomlinskiy V.A. *Programno-apparatniy kompleks opredeleniya rassoglasovaniya uglovogo polozheniya vraschayushihnya debalansov vibrovov-buditeley* [Hardware-Software Complex Determining Mismatch of the Angular Position Rotating Unbalance Vibration Exciters], (2013), *Spetsvipusk Vestnika NTU "HPI"*, Kharkiv, Ukraine, *KhPI*, Vol. 36, pp. 211 – 212 (In Russian).



Осадчий  
Владимир Владимирович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
электропривода и автоматизация  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та,  
69063, г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64.  
Тел. (061) 7698313.  
E-mail:  
w.osadchiy@gmail.com



Назарова  
Елена Сергеевна,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
электропривода и автоматизация  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та.  
69063, г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64.  
Тел. (061) 7698313. E-mail:  
nazarova16@gmail.com



Васильева  
Евгения Владимировна,  
ст. преподаватель каф. электропривода и автоматизация  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та. 69063, г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64.  
Тел. (061) 7698313.  
E-mail: 17irl@rambler.ru



Новомлинский  
Владимир Александрович,  
магистрант каф. электропривода и автоматизация  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та. 69063, г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64. Тел. (068) 408 29 79.  
E-mail:  
vladimir.novomlinskij@mail.ru



Ткачев  
Александр Александрович,  
студент 4-го курса каф. электропривода и автоматизация  
промышленных установок  
Запорожского нац. технического ун-та. 69063, г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64.  
Тел. (096)508 19 30.  
E-mail: yambec@yandex.ua