

УДК 621.316.91:621.335.0

**О. Н. Синчук**, д-р техн. наук,  
**И. О. Синчук, В. Н. Будников**, кандидаты техн. наук,  
**В. О. Черная**

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА-ОГРАНИЧИТЕЛЯ ВСПЛЕСКА НАПРЯЖЕНИЯ В ЧАСТОТНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Аннотация.** Приведено авторское видение проблемы выбора параметров фильтра-ограничителя. В силу специфики функционирования импульсных преобразователей напряжения питания тяговых электрических двигателей обоснована необходимость и целесообразность разработки методики выбора параметров фильтра-ограничителя бросков напряжения на входе тягового IGB-транзисторного преобразователя.

**Ключевые слова:** фильтр, электротехнический комплекс, тяговый двигатель, преобразователь, конденсатор, частота, колебания, напряжение, IGB-транзистор

**O. Sinchuk**, ScD.,  
**I. Sinchuk**, PhD., **V. Budnikov**, PhD.,  
**V. Chornaja**

### ON THE METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF FILTER PARAMETERS LIMITER $du/dt$ IN THE STRUCTURE OF IGBT-VOLTAGE CONVERTER TRACTION ELECTROTECHNICAL COMPLEXES

**Abstract.** Given the author's vision problem of choosing the filter parameters limiter. Due to the specific functioning of the traction power supply switching converters of traction electric motors necessity and feasibility of development of procedures for the selection of the filter parameters limiter surge inlet traction IGB-transistor inverter.

**Keywords:** filters, electrical complex, traction motor, transformer, capacitor, frequency, amplitude of fluctuations, voltage, IGB transistor

**О. М. Синчук**, д-р техн. наук,  
**І. О. Сінчук, В. М. Будніков**, кандидати техн. наук  
**В. О. Чорна**

### ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ФИЛЬТРА-ОБМЕЖУВАЧА СТРИБКА НАПРУГИ В ЧАСТОТНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

**Анотація.** Наведено авторське бачення проблеми вибору параметрів фільтра-обмежувача. В силу специфіки функціонування імпульсних перетворювачів напруги живлення тягових електричних двигунів обґрунтовано необхідність і доцільність розробки методики вибору параметрів фільтра-обмежувача стрибків напруги на вході тягового IGB-транзисторного перетворювача.

**Ключові слова:** фільтр, електротехнічний комплекс, тяговий двигун, перетворювач, конденсатор, частота, коливання, напруга, IGB-транзистор

**Введение.** Важными слагаемыми элементами структур тяговых электромеханических комплексов (ТЭТК) являются входные фильтры. В свою очередь не менее важным для эффективного функционирования ТЭТК и выполнения возлагаемых на вышеприведенные элементы функций является правильный выбор как их структур, так и параметров [1 – 4].

**Материал исследований.** В структурах ТЭТК контактных рудничных электровозов фильтр необходим для защиты системы от циркуляции напряжения частотой  $f_c = 6f_{ном} = 6 \cdot 50 = 300 \text{Гц}$ , генерируемого в контактную сеть выпрямителями тяговых подстанций, а также как автономный источник электрической энергии для кратковременного поддержания напряжения питания на тяговых электрических двигателях (ТЭД) при отрыве пантографа электровоза от кон-

тактной провода. Как правило, фильтры выполняются по Г-образной схеме [5].

Для предложения по выбору методики расчета параметров фильтра данной структуры и данного назначения, в силу вышеизложенного, рассмотрим следующую тактику данного этапа.

Из теории цепей для четырехполюсника находим его параметры:

$$Z_1 = j\omega L, Z_2 = \frac{1}{j\omega C}, Z_1 \times Z_2 = \rho^2,$$

где  $Z_1, Z_2$  – индуктивное и емкостное сопротивление фильтра.

Характеристическое (волновое) сопротивление фильтра

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

© Синчук О.Н., Синчук И.О., Будников В.Н.,  
Черная В.О., 2014

Коэффициенты передачи и затухания  

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, b = \ln \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right|.$$

Учитывая  $U_1 = I \left( \frac{Z_1}{2} + 2Z_2 \right), U_2 = I \times 2Z_2$ , находим

$b = \ln \frac{I}{\frac{\omega_z^2}{\omega_z^2 - 1}}$ , частота среза фильтра

$$\omega_z = \frac{2}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_z, f_z = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}.$$

Проходная полоса частот (полоса пропускания, прозрачность)  $\omega < \omega_z$  при  $b = 0$ .

Полоса подавления частот  $\omega > \omega_z$  при  $b \gg 0$ .

При заданном затухании  $b_{\text{задан}}$  находится  $\omega_b = \omega_z \sqrt{\exp b + 1}$ , переменная составляющая напряжения  $U_2$  на выходе фильтра будет с подавленной высокой частотой  $\omega_b > \omega_z$ .

Общий вид частотной характеристики данного типа фильтра приведен на рис. 1.

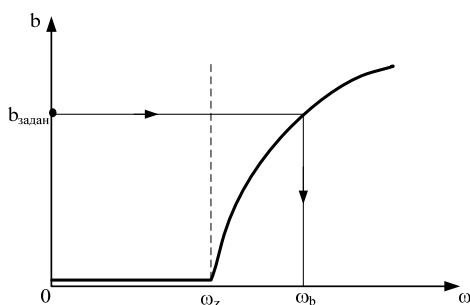


Рис. 1. Частотная характеристика фильтра

Последующий этап расчета параметров фильтра сводится к следующему. Ориентировочно,

$$C \equiv \frac{\Delta I_d \tau_0}{\Delta U_d}, \text{ при этом } \Delta I_d = i_{d \max} - i_{d \min} - \text{ величина}$$

прерываемого тока в цепи питания преобразователей в момент отключения IGB транзистора чоппера в процессе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (величина тока, протекающего через конденсатор в течение времени  $\tau_0$ ), допущение:  $\Delta I_d = const$  на интервале  $\tau_0$ ,  $i_{d \max}$  – мгновенное значение тока в дросселе фильтра перед отключением IGB транзистора;  $i_{d \min}$  – мгновенное значение тока на входе преобразователей после отключения IGB транзистора;  $\tau_0$  – интервал времени между моментами отключения IGB транзистора и включения его вновь;  $\Delta U_d$  – допустимый размах колебаний напряжения на конденсаторе; наибольший размах в момент времени

$$\tau_0 = \frac{T_M}{2} = \frac{1}{2f_M},$$

где  $f_M$  – частота ШИМ.

Далее, полагая  $f_c = f_z = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$ , находим

$$L = \frac{1}{\pi^2 f_c^2 C}; \omega_z = \frac{2}{\sqrt{LC}}; \omega_b = \omega_z \sqrt{\exp b + 1}.$$

Режим работы ТЭТК с ШИМ напряжения сопровождается чрезмерно крутыми фронтами модулирующих импульсов напряжения, в результате чего:

- снижается срок службы изоляции двигателя и кабелей;
- в двигателе наводятся высокочастотные блуждающие токи, что приводит к преждевременному износу подшипников;
- генерируются радиопомехи, ведущие к нарушению работы устройств связи [6 – 8].

Исключить высокочастотные слагаемые токов можно механически – изолировав торцевые подшипниковые щиты от станины; однако для ТЭД это неприемлемо, так как снижает прочность конструкции.

В общепромышленном электроприводе для улучшения электромагнитной совместимости инвертора и двигателя между ними устанавливают LC-фильтры, ограничивающие скорость нарастания модулирующих импульсов напряжения (рис. 2).

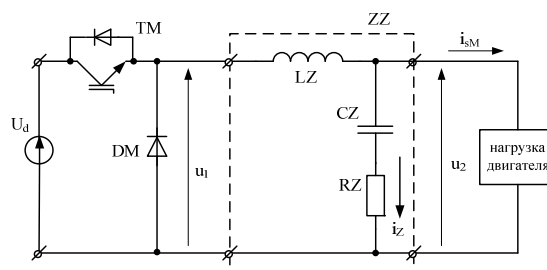


Рис. 2. Принципиальная схема фильтра-ограничителя скорости нарастания модулирующих импульсов

Однако эти фильтры формируют крутизну фронтов импульсов в зависимости от длины монтажного кабеля между инвертором и ТЭД, тем самым исключают перенапряжения на двигателе из-за эффекта отраженной волны. В шахтных электровозах длины кабелей малы для возможностей проявления эффекта отраженной волны, поэтому такой подход неприемлем для решения отмеченных проблем. Величина градиента импульсов, при которой сохраняется живучесть изоляции, и блуждающие токи сводятся до приемлемого значения, не определена, в технической литературе данных по этому вопросу не обнаружено. Единственное, что может гарантировать нормальные условия работы изоляции и исключить блуждающие токи, так это напряжение с искажением высшими гармониками не более 10 % по стандарту для промышленных сетей [9 – 10]. При разработке фильтра-ограничителя принято: в рамках габаритов, отводимых под фильтр, рассчитывать его параметры, имея в виду минимальные искажения. Наибольшие искажения при ШИМ дает гармоника с частотой модуляции  $f_M$ , которую следует блокировать.

Такой негативный фактор как генерация радиопомех не является определяющим для выходного

фильтра, поскольку радиопомехи нижнего уровня частично экранируются, а верхнего уровня блокируются фильтром гармоника модуляции.

Нижний уровень допустимой частоты промышленной радиопомехи по различным данным составляет  $f_v = 9 - 10 - 15 \text{ кГц}$  [9]. Примем  $f_v = 8 \text{ кГц}$  с запасом. Собственная (резонансная) частота фильтра  $f_z$  обычно вдвое меньше граничной частоты, в нашем случае это  $f_z = f_v / 2 = 4 \text{ кГц}$ , т.е. совпадает с частотой модуляции, что недопустимо. Поэтому принимаем собственную частоту фильтра-ограничителя  $f_z = 8 \text{ кГц}$ , по крайней мере, вдвое больше частоты модуляции, а для демпфирования колебаний в фильтре служит резистор RZ. В общем случае

$$f_z = k_f f_m, \quad (1)$$

где  $k_f \geq 2$   $f_m \leq 4 \text{ кГц}$ .

Тогда круговая частота колебательного контура

$$\omega_z = 2\pi k_f f_m = k_f \omega_m, \quad (2)$$

откуда

$$L_z C_z = \frac{1}{(2\pi f_z)^2}. \quad (3)$$

Принимаем амплитуду импульса напряжения на выходе фильтра (на зажимах двигателя), как показано на рис. 3,

$$U_{2m} \leq k_U U_d. \quad (4)$$

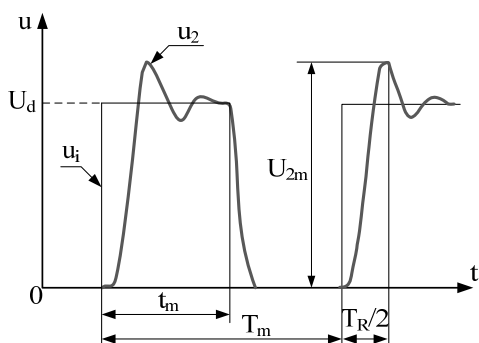


Рис. 3. Диаграмма импульсов напряжения  $u_1$  – на входе фильтра,  $u_2$  – на выходе фильтра

С учетом допустимого искажения коэффициент превышения напряжения

$$k_U = 1,1 - 1,2. \quad (5)$$

При установке фильтра на выходе инвертора IGB-транзисторные модули дополнительно нагружаются током  $i_z$ , протекающим в контуре LZ-CZ-RZ.

Общепромышленные электроприводы с IGB-транзисторными инверторами нормируют ток с пульсацией, регламентированной стандартами:

- номинальная амплитуда пульсаций не более 5 % амплитуды тока  $I_{Mm}$ ;
- максимальная 10 %.

С учетом этого выбираются номиналы IGB-транзисторных модулей. Таким образом, в расчет параметров фильтра принимают условие, чтобы сумма амплитуды колебательного тока среднего значения тока двигателя не превышала максимального значения тока IGBT, т.е. чтобы амплитуда колебательного тока была не более амплитуды пульсации  $I_{zm} \leq \Delta I$  (рис. 4).

В общем случае

$$I_{zm} = \frac{U_d}{\rho_z} \leq k_i \bar{I}_M, \quad (6)$$

где  $\bar{I}_M$  – среднее значение тока двигателя;  $k_i$  – коэффициент дополнительной нагрузки IGB-транзисторного модуля по току;  $\rho_z = \sqrt{\frac{L_z}{C_z}}$  – волновое сопротивление контура. При этом должно выполняться условие  $R_z(2\rho_z)$ .

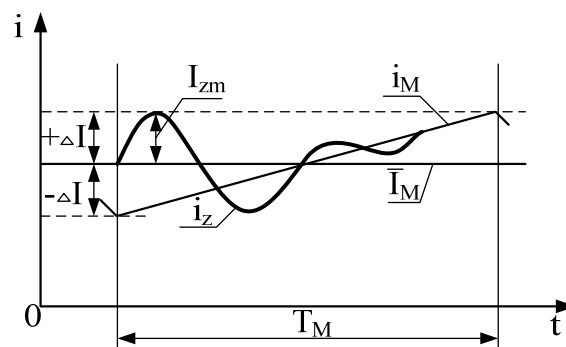


Рис. 4. Диаграмма токов

Из (6) следует

$$\frac{L_z}{C_z} \geq \left( \frac{U_d}{k_i \bar{I}_M} \right)^2. \quad (7)$$

Во избежание «раскачки» колебательного контура переходной процесс в нем, возникающий каждый раз при подаче моделирующего прямоугольного импульса, должен завершаться к концу периода модуляции  $T_M = \frac{1}{f_M}$ , т.е. должно соблюдаться следующее условие:

$$\delta_z T_M = 2\pi \frac{\delta_z}{\omega_M} \geq k_R, \quad (8)$$

где  $k_R$  – коэффициент демпфирования, обычно  $k_R = 4,6$ ;  $\delta_z = \frac{R_z}{2L_z}$  – коэффициент затухания колебательного процесса,

$$R_z \geq \frac{1}{\pi} K_R \omega_M L_z = 2k_r \cdot f_m \cdot L_z. \quad (9)$$

Рассмотрим подробнее выражение (6). В реальном колебательном контуре изменение напряжения на конденсаторе фильтра CZ описывается уравнением

$$U_c = U_d \left[ 1 - \frac{\omega_z}{\omega_R} \cdot \exp(-\delta_z \cdot t) \cdot \sin(\omega_R t_m + \psi_R) \right], \quad (10)$$

где  $\omega_R = \sqrt{\omega_z^2 - \delta_z^2}$  – круговая частота реального контура при соблюдении (2);  $T_R = \frac{2\pi_z}{\omega_R}$  – период реального колебания;  $\psi_R = \arctg \frac{\omega_R}{\delta_z}$  – фазовый сдвиг.

Напряжение на конденсаторе CZ достигает максимума, т.е. амплитудного значения в момент времени  $t_m = \frac{T_R}{2} = \frac{\pi}{\omega_R}$ , при котором в формуле (10) с учетом (8)

$$\sin(\omega_R t_m + \psi_R) = \sin(\pi + \psi_R) = -\sin \psi_R;$$

$$\psi_R = \arctg \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot k_f}{k_R}\right)^2 - 1};$$

$$\sin \psi_R = \frac{\operatorname{tg} \psi_R}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi_R}} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_R}{2\pi \cdot k_f}\right)^2}; \quad (11)$$

$$\frac{\omega_z}{\omega_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_R}{2\pi \cdot k_f}\right)^2}};$$

$$\exp(-\delta_z t_m) = \exp\left(-\delta_z \frac{\pi}{\omega_R}\right) = \exp\left[-\frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot k_f}{k_R}\right)^2 - 1}}\right].$$

В итоге получено выражение для проверки принятых ограничений:

$$\frac{U_{cm}}{U_d} = \frac{U_{2m}}{U_d} = k_U = 1 + \exp\left[-\frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot k_f}{k_R}\right)^2 - 1}}\right]. \quad (12)$$

В нашем случае  $k_f = 2$ ,  $k_R = 4,6$ . Находим  $k_U = 1,29$ , что больше принятого согласно (5). Поскольку коэффициент превышения напряжения в (5) задан произвольно, то при расчете параметров фильтра-ограничителя можно либо принять  $k_U = 1,29$  и иметь заданный колебательный характер переходного процесса, либо увеличить сопротивление  $R_z$  согласно (9), тем самым увеличить демпфирование колебаний

и понизить выброс напряжения на выходе фильтра до любого уровня.

На основании изложенного, предлагается методика расчета параметров фильтра-ограничителя  $du/dt$  градиента модулированных импульсов напряжения ТЭТК:

– исходные данные электропривода:  $U_d$ ,  $f_M$ ,  $k_i$ ,  $k_u$ ; задаем  $f_z = 8k_f \omega$  и находим  $k_f$ ;

– принимаем  $L_z$ ,  $C_z$ , находим  $L_z/C_z$ ;

– решая совместно (4) и (8), находим  $L_z$  и  $C_z$ ;

– задаем  $k_R$ , находим  $R_z$ ; определяем  $k_u$ . Если  $k_u$  приемлем, расчет окончен. Если  $k_u$  неприемлем, корректируем  $k_R$  и повторяем расчет до приемлемого результата.

**Выводы.** Предложена методика расчета параметров входного фильтра тяговой цепи рудничного контактного электровоза, которая позволит оптимизировать параметры фильтра по условиям минимизации гармонических составляющих тока и напряжения на входе IGBT-преобразователя.

#### Список использованной литературы

- Синчук О. М. Нештатні режими і структура системи захисту від них при функціонуванні двоосних електровозів / О. М. Синчук, В. О. Чорна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2/2012. – С. 100 – 104.
- Синчук О. М. Дослідження псевдоаварійних режимів роботи імпульсних перетворювачів тягових електротехнічних комплексів рудникових електровозів / О. М. Синчук, І. О. Синчук, В. О. Чорна // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – С. 36 – 37.
- Маркин В. В. Техническая диагностика вентиляционных преобразователей / В. В. Маркин, В. Н. Миронов, С. Г. Обухов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
- Гончаров Ю. П. Перетворювальна техніка: підручник / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьоний, В. Г. Морозов та ін.; під ред. В. С. Руденко. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
- Флора В. Д. Расчет Г-образного фильтра на входе импульсного регулятора / В. Д. Флора // Труды МЭИ. – 1993. № 669. – С. 104 – 108.
- Huang F., and Flett F., (2007), IGBT Fault Protection Based on di/dt Feedback Control, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1478 – 1484.
- Chokhawala R.S., Catt J., and Kiraly L., (1995), A Discussion on IGBT short-circuit Behavior and Fault Protection Schemes, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 2, pp. 256 – 263, Mar. 1995.
- Lee J., and Hyun D., (2007), Gate Voltage Pattern Analyze for short-circuit Protection in IGBT Inverters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1913 – 1917.
- Жежеленко М. В. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных пред-

приятый / М. В. Жежеленко, О. Б. Шиманский. – К. : Вища школа, 1986. – 112 с.

10. Макаренко М. П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2006. – 241 с.

Получено 18.07.2014

#### References

1. Sinchuk O., Chernaja V. Neshtatni rezhimy i structura systemy zahisty vid nyh pri funktsionuvanni dvoosnih elektrovoziv [Troubleshooting Modes and Structure of the System of Protection Against them in the Operation of Electric], (2012), *Visnyk Vinnickogo Politehnicznego Institutu*, Vinnica, Ukraine, pp. 100–104 (In Ukrainian).

2. Sinchuk O., Sinchuk I., and Cherna V. Doslidzhennya psevdovariynih rezhimiv roboty impulsnih peretvoryuvachiv tyagovyh elektrotehnicnih kompleksiv rudnikovyh elektrovoziv [Research about Emergency Modes of Pulse Transformers Electrical Traction Systems mine Locomotives], (2011), *КNU*, Kremenichuk, Ukraine, pp. 36–37 (In Ukrainian).

3. Markin V., Mironov V., Obuhov S. Technicheskaya diagnostica ventilnyh preobrazovateley [Technical Diagnostics Rectifier Converters], (1985), *Energootomizdat*, Moscow, Russian Federation, 152 p. (In Russian).

4. Goncharov Ju., Budyenyi, O., Morozov V., and Rudenko V. Peretvoryuvalna technika [Conversion Equipment], (2000), *Folio*, Kharkov, Ukraine, 360 p. (In Ukrainian).

5. Flora V. Raschet G-obraznogo filtra na vhode impulsnogo reguljatora [Calculation of the L-shaped inlet Filter Switching Regulator], (1993), *Trudy MEI*, Vol. 669, pp. 104–108 (In Russian).

6. Huang F., and Flett F., (2007), IGBT Fault Protection Based on di/dt Feedback Control, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1478–1484 (In English).

7. Chokhawala R.S., Catt J., and Kiraly L., (1995), A Discussion on IGBT Short-Circuit Behavior and Fault Protection Schemes, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 2, pp. 256–263, Mar. 1995 (In English).

8. Lee J., and Hyun D., (2007), Gate Voltage Pattern Analyze for Short-Circuit Protection in IGBT Inverters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1913–1917 (In English).

9. Zhezhelenko M. Elektromagnitnye pomехи v sistemah elektrosnazheniya promyshlennyh predpriyatiy [Electromagnetic Interference in Industrial Power Systems], (1986), *Vishay Shkola*, Kiev, Ukraine, 112 p. (In Russian).

10. Makarenko M., Senko V., and Jurchenko M. Systemniy analiz elektromagnitnih protsesiv u napivprovodnikovih peretvoriuvachah elektroenergії modulyatsiy-nogo typu [Systems Analysis of Electromagnetic Processes in Semiconductor Converters Electric Modulation

Type], (2006), *Institut Elektrodinamiki NAN Ukrainy*, Kiev, Ukraine, 241 p. (In Ukrainian).



Синчук  
Олег Николаевич,  
д-р техн. наук, проф., зав.  
каф. автоматизированных  
электромеханических систем  
в промышленности и на  
транспорте Государствен.  
высшего учебного заведения  
«Криворожский нац. ун-т»,  
ул. XXII Партсъезда, 11.  
50027, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Синчук  
Игорь Олегович,  
канд. техн. наук, доц., каф.  
автоматизированных элект-  
ромеханических систем в  
промышленности и на  
транспорте Государствен.  
высшего учебного заведения  
«Криворожский нац. ун-т»,  
ул. XXII Партсъезда, 11.  
50027, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Будников  
Всеволод Николаевич,  
канд. техн. наук, доц., зав.  
каф. компьютеризированных  
систем автоматики  
Кременчугского ун-та  
экономики, информационных  
технологий и управления,  
ул. Пролетарская 24/37,  
39600, г. Кременчуг, Украина



Черная  
Виктория Олеговна,  
ассистент каф. систем элект-  
ропотребления и энергетиче-  
ского менеджмента  
Кременчугского нац. ун-та  
им. Михаила Остроградского,  
ул. Первомайская, 20, 39600,  
г. Кременчуг, Украина.  
E-mail:  
chornajav@gmail.com