

УДК 62.83.52

**В. М. Чермалых**, д-р техн. наук,  
**А. В. Чермалых**, канд. техн. наук,  
**И. Я. Майданский**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Аннотация.** Представлена комбинированная модель вентиляторного агрегата в совокупности двигатель – вентилятор, позволяющая определять его рабочие параметры, энергетические и динамические характеристики. Применение такой модели дает возможность оптимизировать рабочий процесс вентиляции за счет правильного выбора рабочей точки, а также оценить энергосберегающие аспекты использования регулируемого электропривода с системой управления, обеспечивающей требуемый технологический режим.

**Ключевые слова:** вентилятор, электропривод, частотное регулирование, рабочая точка, моделирование, технологический параметр, энергосбережение

**V. Chermalykh**, ScD.,  
**A. Chermalykh**, PhD.,  
**I. Maidanskyi**

## RESEARCH OF TECHNOLOGICAL MODES OF FAN SYSTEMS WITH FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

**Abstract.** Presented combined model blower unit in conjunction motor - blower, allowing it to determine the operating parameters, energy and dynamic characteristics. Use of this model makes it possible to optimize the workflow ventilation by proper selection of the working point and evaluate energy-saving aspects of using regulated electric drive with the control system which provides the required technological mode.

**Keywords:** blower, electric drive, frequency regulation, the working point, modeling, technological parameter, energy saving

**В. М. Чермалых**, д-р техн. наук,  
**О. В. Чермалых**, канд. техн. наук,  
**И. Я. Майданский**

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЯТОРІВ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Анотація.** Представлено комбіновану модель вентиляторного агрегату в сукупності двигун - вентилятор, що дозволяє визначити його робочі параметри, енергетичні та динамічні характеристики. Застосування такої моделі дає можливість оптимізувати робочий процес вентиляції за рахунок правильного вибору робочої точки, а також оцінити енергозберігаючі аспекти використання регульованого електроприводу з системою управління, котра забезпечує потрібний технологічний режим.

**Ключові слова:** вентилятор, електропривод, частотне регулювання, робоча точка, моделювання, технологічний параметр, енергозбереження

**Введение.** При проектировании и эксплуатации вентиляторных установок основной задачей является реализация экономичных режимов их работы. В первую очередь для этого необходимо обеспечить правильный выбор рабочей точки, когда производительность и давление вентилятора соответствуют характеристике вентиляционной сети. Наиболее эффективно задача решается за счет применения систем регулируемого электропривода переменного тока [1, 2]. Кроме того, потребность в регулировании режимов работы вентиляторных агрегатов обусловлена и внешними независимыми факторами, такими как сезонные и суточные изменения температуры, влажность, загазованность и запыленность воздуха, что зачастую определяется типом помещения. Например, рассматриваемая в работе система вентиляции кинотеатров отличается от офисной или производственной. Необходимо учитывать

тот факт, что одновременно в относительно небольшом пространстве находится большое количество людей достаточно длительное время и зрительный зал необходимо обеспечивать свежим воздухом. При этом основными технологическими параметрами воздушной среды являются температура, содержание углекислого газа и влажность [3].

В литературных источниках, посвященных вопросам исследования режимов работы машин и установок, в большинстве случаев рассматриваются в отдельности или система электропривода механизма или сама установка. В этом случае упрощается процесс исследования, однако при этом не учитываются технологические параметры и координаты, которые фактически и определяют рабочий режим машины или установки. Тенденцией последнего времени является рассмотрение системы электропривода и механизма совместно, как единого технологического агрегата. Такой подход особенно удобен для турбомеха-

низмов, поскольку имеется необходимый математический аппарат, описывающий рабочие процессы, происходящие при их функционировании [4].

На основании вышеизложенного тему работы можно считать актуальной.

**Анализ предыдущих исследований.** Работа посвящена исследованию режимов работы вентиляторной установки с частотно-регулируемым электроприводом, как единого технологического объекта, с помощью комбинированной компьютерной модели. Выбор системы ПЧ-АД обусловлен рекомендациями к ее массовому применению для турбомеханизмов в целом, и для вентиляторов в частности, за счет высокой энергоэффективности такой системы.

В работе использованы общие подходы, изложенные в учебном пособии [5]. Предлагаемый материал базируется [6, 7], которые посвящены вопросам исследования режимов работы насосных установок с частотно-регулируемым электроприводом.

**Цель работы.** На основе исследования режимов работы вентиляторной установки с частотно-регулируемым электроприводом с помощью комбинированной компьютерной модели оценить влияние рабочих параметров на динамику и энергетические показатели электромеханической системы.

**Материал и результаты исследования.** В качестве объекта в работе рассмотрена вентиляторная установка для проветривания зрительного зала кинотеатра на базе вентилятора ВР-86-77-6,3 с приводным двигателем АИР100Л4. Для проведения исследований синтезирована комбинированная модель с использованием системы MATLAB-Simulink [8], представленная на рис. 1.

Модель состоит из двух основных частей, которые соответствуют системе электропривода и непосредственно вентилятору.

Структурная часть модели частотно-регулируемого электропривода выполнена линеаризованной согласно наиболее применяемому в настоящее время варианту [9, 10]. Такое решение связано с тем, что рабочий участок механической характеристики современного электропривода имеет высокую жесткость и при регулировании скорости остается практически линейным. Кроме того, в работе [11] показана идентичность полученных результатов с использованием полной и линеаризованной моделей частотного электропривода. Система управления напряжением  $U$  преобразователя частоты  $UZ$  выполнена по современной структуре одноконтурной с цифровым ПИД-регулятором температуры воздуха  $AT$ , которая является контролируемым технологическим параметром. Блок  $UE$  задает коэффициент передачи внутренней обратной связи по ЭДС двигателя  $E$ . С помощью блока  $UT$  формируется сигнал  $U_{ot}$  отрицательной обратной связи по температуре  $T$ . Блок  $TU$  обеспечивает согласование сигнала задания температуры  $U_t$  блоком  $ET$  с физической величиной  $T_o$ .

Основу математической модели вентилятора составляют вычислители, которые собраны на базе типового блока  $Fcn$  и осуществляют определение рабочих параметров и энергетических характеристик вентилятора в функции угловой скорости  $\omega$ .

Блоки  $Fcn1$ ,  $Fcn2$  – реализуют зависимости для определения производительности  $Q = f(\omega)$  и давления  $p = f(\omega)$

$$Q = Q_n \cdot \frac{\omega}{\omega_n},$$

$$p = p_n \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2,$$

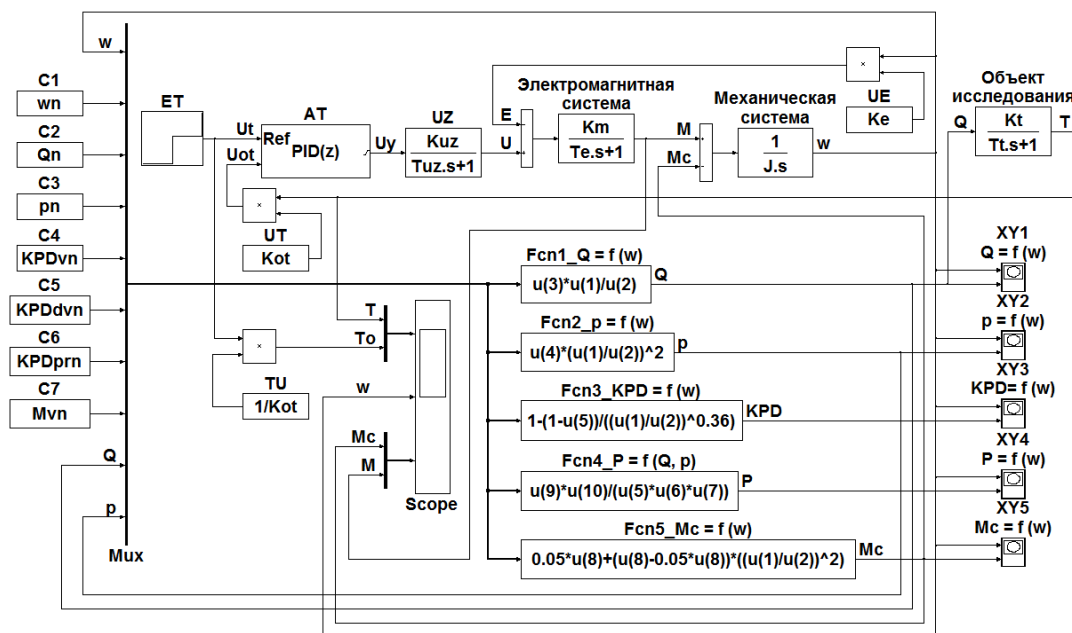


Рис. 1. Компьютерная модель вентиляторной установки

где  $Q_n$  – номинальная производительность вентилятора (паспортные данные),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega_n$  – номинальная рабочая угловая скорость двигателя (определяется по  $Q$ - $p$  характеристикам вентилятора),  $1/\text{с}$ ;  $p_n$  – номинальное полное давление вентилятора (паспортные данные), Па.

Вычислители  $Fcn3$ ,  $Fcn4$  – функционируют согласно формулам для вычисления коэффициента полезного действия  $\eta_v = f(\omega)$  и потребляемой активной мощности  $P = f(Q, p)$

$$\eta_v = 1 - \frac{1 - \eta_{vn}}{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{0,36}},$$

$$P = \frac{Q \cdot p}{\eta_v \cdot \eta_{dvn} \cdot \eta_{pnm}},$$

где  $\eta_{vn}$ ,  $\eta_{dvn}$ ,  $\eta_{pnm}$  – номинальные значения КПД соответственно вентилятора, приводного двигателя и преобразователя частоты (паспортные данные).

Блок  $Fcn5$  – вычисляет момент статического сопротивления  $M_c = f(\omega)$

$$M_c = M_{xx} + (M_{vn} - M_{xx}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2,$$

$$M_{vn} = \frac{Q_n \cdot p_n}{\eta_{vn}},$$

где  $M_{vn}$  – номинальный статический момент вентилятора, Н·м;  $M_{xx} \approx 0,05 \cdot M_{vn}$  – момент холостого хода.

Необходимые для реализации приведенных формул номинальные значения параметров задаются блоками  $C1 \dots C7$  в виде констант. Через объединитель  $Mix$  вычислители выбирают необходимые сигналы и формируют на выходе текущие значения соответствующих величин  $Q$ ,  $p$ ,  $\eta$ ,  $P$ ,  $M_c$ . Визуализацию работы модели в виде фазовых траекторий обеспечивают графопостроители  $XU1 \dots XU5$  (рис. 2).

Используя зависимости  $Q = f(\omega)$  и  $p = f(\omega)$ , имеется возможность для любого значения угловой скорости двигателя  $\omega$  получить соответствующие величины производительности  $Q$  и давления вентилятора  $p$  (рис. 2, а, б), что определяет правильный выбор рабочей точки, позволяя обеспечить технологическую оп-

тимизацию процесса вентиляции. Зависимость  $\eta_v = f(\omega)$  показывает значительное падение КПД вентилятора на низких скоростях (рис. 2, в). При этом для зрительного зала кинотеатра рабочий диапазон регулирования скорости составляет  $D = 1,7:1$  и максимальное снижение КПД в этом диапазоне на 4 % можно считать приемлемым. Характеристика  $P = f(Q, p)$  наглядно иллюстрирует возможность существенной экономии потребляемой активной мощности при использовании частотно-регулируемого электропривода, что подтверждает его энергоэффективность. Полученная зависимость  $M_c = f(\omega)$  отражает требуемый вентиляторный характер изменения статического момента сопротивления. При этом повышается и точность расчетов, так как при определении значения  $M_c$  в любой момент времени учитывается текущее значение угловой скорости  $\omega$ .

Одним из основных технологических параметров, который влияет на комфортное пребывание людей в кинотеатре, является температура, которая напрямую зависит от количества подаваемого воздуха в зрительный зал. Поэтому объект исследования представлен апериодическим звеном с коэффициентом передачи  $K_t$  и постоянной времени  $T_t$  (рис. 1), на вход которого подается сигнал производительности вентилятора  $Q$ , а на выходе получается сигнал температуры  $T$ .

При проведении исследований использован применяемый сегодня на практике алгоритм автоматизированного управления режимом вентиляции в зрительном зале кинотеатра [12]. В ночное время, когда имеет место нерабочий режим, задается и поддерживается температура  $T = 14$  °С. В первой половине дня считается, что зал в среднем заполнен на треть и температура устанавливается  $T = 20$  °С. Во второй половине дня принимается вариант максимального заполнения зрительного зала, чему соответствует температура  $T = 25$  °С.

Графическая иллюстрация описанного алгоритма работы системы вентиляции приведена на рис. 3.

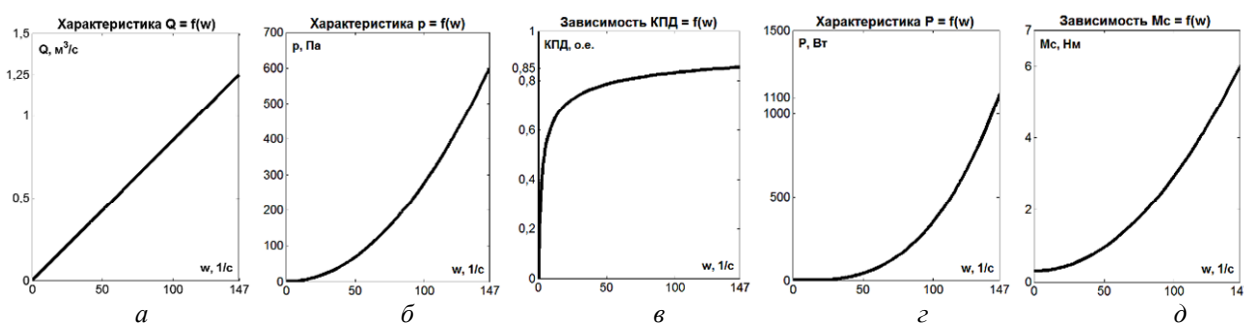


Рис. 2. Графики изменения параметров и энергетических характеристик вентиляторной установки: а –  $Q = f(\omega)$ ; б –  $p = f(\omega)$ ; в –  $\eta_v = f(\omega)$ ; г –  $P = f(Q, p)$ ; д –  $M_c = f(\omega)$

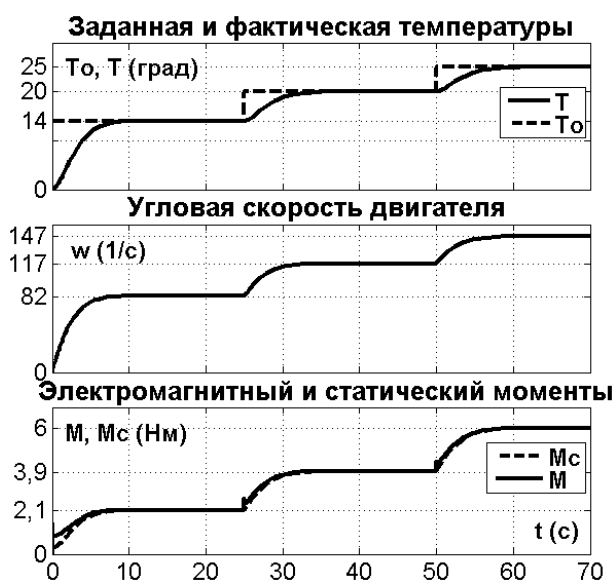


Рис. 3. Диаграммы изменения параметров вентиляторного агрегата в зависимости от загрузки зрительного зала кинотеатра

Результаты моделирования показывают необходимое увеличение скорости приводного двигателя вентилятора в соответствии с возрастанием и поддержанием требуемой температуры в зале. При этом следует отметить хорошую динамику переходных процессов в системе управления по технологическому параметру – температуре, что дает возможность в предлагаемой модели исключить задатчик интенсивности на входе, который практически всегда необходим в обычных скоростных системах регулирования. Практическая реализация рассматриваемого алгоритма обеспечит значительную экономию электроэнергии за счет снижения потребляемой активной мощности при использовании частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки. Хотя компьютерная модель не может в полной мере отразить все процессы, протекающие в реальной электромеханической системе, полученные количественные показатели заслуживают внимания. При моделировании процесса регулирования и поддержания требуемой температуры в зрительном зале кинотеатра для трехуровневого регулирования скорости потребляемая активная мощность вентиляторной установки совместно с частотно-регулируемым электроприводом составляет соответственно: 194 Вт (ночное время), 605 Вт (первая половина дня), 1100 Вт (вторая половина дня). Таким образом, имеет место экономия потребляемой активной мощности на 82 % (нерабочий режим) и 45 % (неполная загрузка зрительного зала).

**Выводы.** Полученные результаты показывают, что имеется возможность синтеза комбинированной компьютерной модели вентиляторной установки, которая является универсальной и может быть применена для систем вентиляции как гражданских, так и промышленных зданий и сооружений, при этом в модели необходимо только задать номинальные параметры вентилятора и приводного двигателя. Исследование

рабочих режимов функционирования вентиляторного агрегата подтвердили эффективность и целесообразность применения системы ПЧ-АД, позволяющей организовать рациональный выбор рабочей точки вентилятора для минимизации потребления электроэнергии.

#### Список использованной литературы

1. Онищенко Г. Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок [Текст] / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов и др.; под. общ. ред. Г. Б. Онищенко. – М. : РАСНХ, 2001. – 520 с.
2. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
3. Калашников М. П. Вентиляция общественных зданий : учеб. пособие [Текст] / М. П. Калашников. – Улан-Удэ : Издательство ВСГУТУ, 2003. – 160 с.
4. Гришко А. П. Стационарные машины и установки : учеб. пособие для вузов [Текст] / А. П. Гришко, В. И. Шелоганов. – М. : Издательство МГУ, 2004. – 328 с.
5. Фащиленко В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие [Текст] / В. Н. Фащиленко. – М. : Издательство «Горная книга», 2011. – 260 с.
6. Чермалых А. В. Определение параметров насосной установки при изменении угловой скорости с помощью структурной модели [Текст] / А. В. Чермалых, Ю. И. Затирка, О. Б. Доценко // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 10–11 квітня 2014 р.* – Кременчук : КрНУ, 2014. – С. 61 – 62.
7. Чермалых А. В. Моделирование технологических режимов работы насосных установок с частотно-регулируемым электроприводом [Текст] / А. В. Чермалых, И. Я. Майданский, О. Б. Доценко, Ю. И. Затирка // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання.* – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014(2). – С. 49 – 52.
8. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель [Текст] / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
9. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высших учеб. заведений [Текст] / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под. ред. В. М. Терехова. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.
10. Мальцева О. П. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: Учеб. Пособие [Текст] / О. П. Мальцева, Л. С. Удут, Н. В. Кояин; Томский политехнический университет. – Томск : Издательство ТПУ, 2011. – 476 с.
11. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
12. Чайковский Г. П. Отопление и вентиляция здания : Учебное пособие [Текст] / Г. П. Чайковский,

А. В. Путько. – Хабаровск : Издательство ДВГУПС, 2003. – 70 с.

Получено 04.07.2014

#### References

1. Onishchenko G.B., Aksenov M.S., and Koyain V.P. *Avtomatizirovaniy elektroprivod promyshlennykh ustanovok* [Automated Electric Drive Industrial Units], (2001), Moscow, Russian Federation, *RASNH Publ.*, 520 p. (In Russian).

2. Leznov B.S. *Energoberejenie i regyлируemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive for Pump and Blower units], (2006), Moscow, Russian Federation, *Energootomizdat Publ.*, 360 p. (In Russian).

3. Kalashnikov M.P. *Ventilyatsiya obshchestvennykh zdaniy* [Ventilation Public Buildings], (2003), Ulan-Ude, Russian Federation, *VSGTU Publ.*, 160 p. (In Russian).

4. Grishko A.P., and Sheloganov V.I. *Statsionarnyye mashiny i ustanovki* [Stationary Machines and Units], (2004), Moscow, Russian Federation, *MGGU Publ.*, 328 p. (In Russian).

5. Faschilenko V.N. *Reguliruemyy elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok gornyykh predpriyatiy* [Adjustable Electric Drive for Pump and Blower units of Mining Enterprises], (2011), Moscow, Russian Federation, *Gornaya kniga Publ.*, 260 p. (In Russian).

6. Chermalykh A.V., Zatirka Y.I., and Dotsenko O.B. *Opreделение parametrov nasosnoy ustanovki pri izmenenii uglovoi skorosti s pomoschyu strukturnoy modeli* [Determination of Parameters of the Pumping unit when Change of the Angular Velocity using the Structural Model], (2014), *Elektromehanichni ta Energetychni Systemy, Metody Modeluyvannya ta Optymiztsii. Zbirnyk Naukovykh Pratsi XII Mizhnarodnoi Naukovo-tekhnichnoi Konferentsii Molodykh Uchenykh i Spetsialistiv v Misti Kremenchuk 10-11 kvitnya 2014 r.*, Kremenchuk, Ukraine, *KrNU Publ.*, pp. 61 – 62.

7. Chermalykh A.V., Maidanskii I.Y., Dotsenko O.B., and Zatirka Y.I. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh rejimov raboty nasosnykh ustanovok s chastotno-reguliruemym elektroprivodom* [Modelling of Technological Modes of Pumping units with Frequency-controlled Electric Drive], (2014), *Problemy Energoresursozberezhennya v Elektrotekhnichnykh Sistemakh. Nauka, Osvita i Praktika. Naukove Vydannya*, Kremenchuk, Ukraine, *KrNU Publ.*, Vol. 1/2014(2), pp. 49 – 52.

8. Dyakonov V.P. *Simulink 5/6/7: Samouchiteli* [Simulink 5/6/7: Self Help], (2008), Moscow, Russian Federation, *DMK-Press Publ.*, 784 p.

9. Terehov V.M., and Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control Systems of Electric drives], (2008), Moscow, Russian Federation, *“Akademiya” Publ.*, 304 p.

10. Maltseva O.P., Udut L.S., and Koyain N.V. *Sistemy upravleniya asinhronnykh chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov* [Control Systems Asynchronous Variable Frequency Drives], (2011), Tomsk, Russian Federation, *TPU Publ.*, 476 p.

11. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovaniye mehatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Designing Mechatronic Systems on PC], (2008), St. Petersburg, Russian Federation, *KORONA-Vek Publ.*, 368 p.

12. Tchaikovsky G.P. *Otoplenie i ventilyatsiya zdaniya* [Heating and Ventilation of the Building], (2003), Khabarovsk, Russian Federation, *DVGUPS Publ.*, 70 p.



Чермалых  
Валентин Михайлович,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
автоматизации управления  
электротехническими  
комплексами ин-та энергосбе-  
режения и энергоменеджмента  
нац. технического ун-та Ук-  
раины «Киевский политехни-  
ческий ин-т», 03056 Украина,  
г. Киев, ул. Борщаговская 115,  
ком. 416/1.  
E-mail: alvalrik@gmail.com



Чермалых  
Александр Валентинович,  
канд. техн. наук, с. н. с., доц.  
каф. автоматизации управле-  
ния электротехническими  
комплексами Институт  
энергосбережения и энерго-  
менеджмента нац. техническо-  
го ун-та Украины «Киевский  
политехнический ин-т».  
03056 Украина, г. Киев, ул.  
Борщаговская 115, ком. 416/1,  
тел.: +38(067) 260-76-39.  
E-mail: alvalrik@gmail.com



Майданский  
Иван Ярославович,  
ст. преподаватель каф.  
автоматизации управления  
электротехническими ком-  
плексами ин-та энергосбере-  
жения и энергоменеджмента  
нац. технического ун-та Ук-  
раины «Киевский политехни-  
ческий ин-т» 03056 Украина,  
г. Киев, ул. Борщаговская 115,  
ком. 407,  
тел./факс: +38(044) 406-80-49.  
E-mail:  
ivanmaidanskiy@gmail.com