

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОКРЕСТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВОЗДУХООБМЕНА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПОМЕЩЕНИИ

© А. М. Шмырин, В. В. Сёмина, Е. П. Трофимов

Липецкий государственный технический университет  
398600, Российская Федерация, г. Липецк, ул. Московская, 30  
E-mail: amsh@lipetsk.ru, pravilnik@mail.ru, trofimovep@list.ru

Рассмотрена система автоматического управления микроклиматом в производственном помещении на примере помещения пульта управления вращательной цементной печи завода. Для управления системой кондиционирования воздуха построена математическая модель с использованием окрестностных систем, позволяющая достичь ресурсосбережения и обеспечить параметры микроклимата, соответствующие нормам.

*Ключевые слова:* математическое моделирование; окрестностная модель; адаптивная идентификация; энергосбережение; системы автоматического управления

### 1. Введение

В апреле 2016 г. 175 государств подписали Парижское соглашение по климату в рамках Конвенции ООН, которое, по сути, является энергетическим соглашением. К 2040 г. эксперты прогнозируют 30%-ное увеличение мирового спроса на энергию [1]. Рост выбросов углекислого газа напрямую связан с ростом энергетики. Поэтому необходимо изменение темпов декарбонизации путем использования активных мер по повышению электрификации и энергоэффективности во всех категориях конечного потребления.

Для российских предприятий актуальной задачей является модернизация производства, позволяющая экономить как энергетические, так и денежные ресурсы. Более половины сегодняшнего потребления электроэнергии в многочисленных технических устройствах (например, в вентиляторах, компрессорах, насосах) приходится на системы с электродвигателями.

Федеральным законом № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», а также Государственной программой РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» одним из способов достижения ресурсосбережения предлагается автоматизация зданий.

Для получения экономии энергии необходим системный подход, включающий не только строгое регулирование, относящееся к двигателям и устройствам, которые их используют, но также и намного более широкое внедрение регулируемых приводов, а также реализацию других мероприятий по повышению их эффективности, таких как создание энергоэффективной системы автоматического управления инженерными системами в помещениях, позволяющей оптимально регулировать параметры микроклимата внутренней среды здания.

### 2. Постановка задачи

Самой энергоемкой из инженерных систем здания является система вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ), так как содержит большое количество подсистем с электродвигателями. СВКВ поддерживает оптимальные климатические параметры внутри здания в пределах, установленных санитарными нормами и правилами.

Микроклимат производственного помещения обеспечивает общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывает отклонений в состоянии здоровья, создает предпосылки для высокого уровня работоспособности.

В данном исследовании ставится задача создать энергоэффективную автоматическую систему управления СВКВ в помещении, которая обеспечит соответствующий санитарным нормам [2] микроклимат.

В качестве объекта исследования рассмотрено помещение пульта управления вращательной цементной печи завода «ЕВРОЦЕМЕНТ групп». Производство цемента является наиболее вредным для человека и экологии региона. Несмотря на то, что холдинг проводит мероприятия для обеспечения экологической безопасности производства и охраны окружающей среды, работники предприятия подвержены таким вредным факторам, как высокое содержание в воздухе пыли, состоящей из цементного клинкера, добавок, готового цемента и угля. Вред наносят и резкие колебания температуры воздуха, и значительная тепловая радиация, шум.

В помещении пульта управления вращательной цементной печи выполняются работы операторского типа, связанные с управлением технологическими процессами, следовательно, с нервно-эмоциональным напряжением, поэтому очень важно соблюдать в нем оптимальные величины показателей воздушной среды. Пульт управления находится в непосредственной близости (на расстоянии 25 метров) от головки вращательной цементной печи, температура которой составляет  $1750^{\circ}\text{C}$ . Это обуславливает достаточно высокие теплопоступления в помещение завода. Пульт управления оснащен двумя рабочими местами. Из-за высокого содержания цементной пыли в атмосферном воздухе постоянно выходят из строя кондиционеры, призванные регулировать температуру в помещении. Помимо температуры, существенной проблемой является недостаточная звукоизоляция помещения, низкая влажность воздуха.

### 3. Математическая модель воздушной среды помещения

Предлагаемая система автоматического управления микроклиматом осуществляет свою работу с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), связывающего воедино работу системы вентиляции и кондиционирования, системы отопления, системы теплоснабжения.

Параметры воздушной среды снаружи и внутри помещения измеряются с помощью датчиков, поступают в качестве входных сигналов в математическую модель, реализованную на языке программирования ПЛК, далее производится анализ данных, реализуется оптимальный алгоритм автоматического управления [3].

Осуществить регулирование объема приточного воздуха в помещении предпочтительнее плавным изменением частоты вращения электроприводов вентиляторов с помощью частотного регулирования. Указанный способ помогает сэкономить большое количество энергии, затрачиваемой на подготовку и распределение воздуха [4–5].

Входными сигналами в модель будут такие параметры, как влагосодержание насыщенного воздуха и воздуха в зоне нахождения людей, подвижность воздуха в помещении, температура воздуха в приточной, вытяжной и рекуперационных системах вентиляции, температура и относительная влажность в рабочей зоне, температурный градиент по высоте помещения, температура воздуха в помещении по показаниям мокрого термометра, количество людей в помещении, режим работы (день/ночь). По показаниям этих параметров определяется необходимое количество приточного, вытяжного, рекуперационного воздуха [6], т. е. выходом модели будут частоты вращения электропривода соответствующих вентиляторов.

Математическую модель микроклимата помещения пульта управления вращательной цементной печи можно представить в виде дискретной динамической системы [7], описываемые уравнением

$$X_{n+1} = F(X_n, A_n, U_n, n) \quad (1)$$

где  $X_n \in R^m$  – вектор состояния;  $A_n$  – вектор параметров, принадлежащий некоторой ограни-

ченной, но априори неизвестной области  $\{G_A\} \subseteq R^k$ ;  $U_n \in R^k$  – вектор управления;  $n$  – дискретное время;  $F(\cdot)$  – вектор-функция, непрерывно дифференцируемая по  $X_n, A_n, U_n$ .

На движениях системы (1) рассматривается функционал (функция Ляпунова)  $V_n = V(X_n, n)$ .

Алгоритм адаптации параметров модели  $A_n$  ищется таким образом, чтобы выполнялось целевое условие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n, n) = 0. \quad (2)$$

Алгоритм адаптации вектора  $A_n$  имеет вид

$$A_{n+1} = A_n - \Gamma \text{grad}_A \Delta V_n. \quad (3)$$

Рассмотрим задачу оценки параметров системы, для этого рассмотрим динамическое представление относительно выхода системы [8]. Билинейные системы являются простейшими нелинейными системами, наиболее близкими к линейным. Представляет интерес изучение их динамики, адаптации, а также оценки параметров. Рассмотрим билинейную окрестностную систему, содержащую линейные члены и билинейный член, вида

$$\sum_{\alpha \in O_x[a]} w_x[a, \alpha], x[\alpha] + \sum_{\beta \in O_v[a]} w_v[a, \beta], v[\beta] + \sum_{\substack{\alpha \in O_x[a] \\ \beta \in O_v[a]}} w_{x,v}[a, \alpha, \beta] x[\alpha] v[\beta] = 0, \quad (4)$$

где  $v[a] \in R^m$ ,  $x[a] \in R^n$  – управление, состояние в узле системы;  $O_x$ ,  $O_v$  – окрестности вершины  $a$  носителя по состоянию и входному воздействию соответственно;  $a, \alpha, \beta \in A$ ,  $A$  – множество значений дискретного аргумента системы, имеющего мощность  $N$ ,  $w_x[a, \alpha] \in R^{c \times n}$ ,  $w_v[a, \beta] \in R^{c \times m}$ ,  $w_{xv}[a, \alpha, \beta] \in R^{c \times n \times m}$  – матрицы-параметры.

Зафиксируем некоторое  $\mu \in A, \mu \in O_x$ . Найдем для данного значения аргумента вектор  $x[\mu]$

$$x[\mu] = - \sum_{\alpha \in O_{1,x}[a]} K_x[a, \alpha], x[\alpha] - \sum_{\beta \in O_v[a]} K_v[a, \beta], v[\beta] - \sum_{\substack{\alpha \in O_x[a] \\ \beta \in O_v[a]}} K_s[a, \alpha, \beta] s[x, v, \alpha] v[\beta], \quad (5)$$

где  $O_{1,x} \cup \mu = O_x$ ,  $s[x, v, \alpha] v[\beta]$  – вектор, зависящий от произведения компонентов векторов  $x, v$ ,  $K$  – соответствующие произведения матриц-параметров [8].

Рассмотрим теперь задачу оценки параметров системы (5). Пусть известно множество измерений  $I = x[k], v[k], k \in A$  и необходимо оценить матрицы  $K_x[\cdot]$  и  $K_v[\cdot]$ ,  $K_s[\cdot]$  в (5).

Вводится адаптивная модель [8]

$$\check{x}[\mu] = - \sum_{\alpha \in O_{1,x}[a]} \check{K}_x[a, \alpha], \check{x}[\alpha] + \sum_{\beta \in O_v[a]} \check{K}_v[a, \beta], v[\beta] - \sum_{\substack{\alpha \in O_x[a] \\ \beta \in O_v[a]}} \check{K}_s[a, \alpha, \beta] x[\alpha] v[\beta], \quad (6)$$

где  $\check{x}[\alpha], \check{K}_v[a, \beta] \forall \alpha, \beta \in A$ ,  $\check{K}_s[a, \alpha, \beta]$  – матрицы настраиваемых параметров системы,  $\check{x}[\mu]$  – выход модели.

Обозначим через  $e[\mu] = \check{x}[\mu] - x[\mu]$  ошибку идентификации.

Параметры (6) оцениваются при помощи алгоритмов:

$$\check{K}_x[a, \mu] = \check{K}_x[a, \mu - \Delta\mu] + T_x[a] e[\mu - \Delta\mu] x^T[\mu - \Delta\mu], \quad (7)$$

$$\check{K}_v[a, \mu] = \check{K}_v[a, \mu - \Delta\mu] + T_v[a] e[\mu - \Delta\mu] v^T[\mu - \Delta\mu], \quad (8)$$

$$\check{K}_s[a, \mu_s] = \check{K}_s[a, \mu_s - \Delta\mu_s] + T_s[a] e[\mu_s - \Delta\mu_s] s^T[\mu_s - \Delta\mu_s], \quad (9)$$

где  $\Delta\mu \in R$  – шаг изменения аргумента  $\mu \in O_{1,x}$ ,  $\Delta\mu \in O_{1,x}$ ,  $T_x[a]$ ,  $T_v[a]$ ,  $T_s[a]$  – некоторые положительно определенные симметрические матрицы, обеспечивающие сходимость адаптивных алгоритмов.

Схема системы адаптивной идентификации описана на рис. 1.

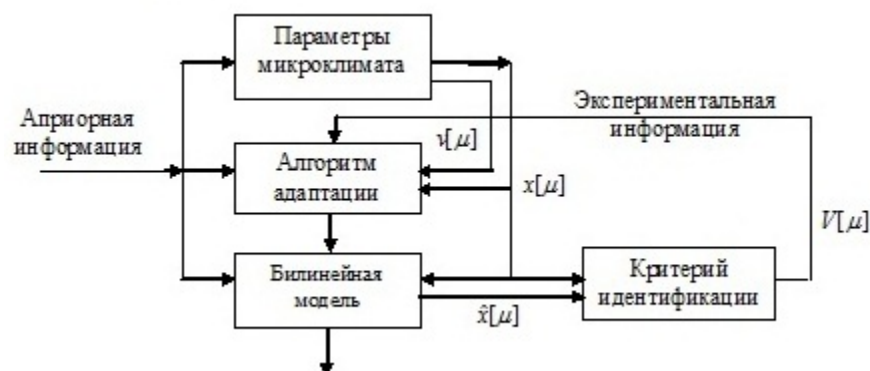


Рис. 1. Схема системы адаптивной идентификации

Наиболее простой вариант, который допускает измерение параметров системы управления вентиляцией, может быть представлен как совокупность трех узлов: «поступление информации с датчиков», «обработка измеренных данных», «состояние после регулирования ПЛК», также можно добавить узел «микроклимат в целом», который будет связан со всеми другими подсистемами.

#### 4. Заключение

В данном исследовании разработана математическая модель микроклимата помещения на основе окрестностных систем. Окрестностные системы обобщают классические дискретные и позволяют на этапе управления применять метод смешанного управления для определения всех или части неизвестных координат векторов управления и состояния [9]. Направлением дальнейшего исследования будет являться синтез адаптивных алгоритмов идентификации нелинейных смешанных окрестностных систем.

Управление параметрами микроклимата осуществляется путем регулирования электроприводов приточной, вытяжной, рекуперативной подсистем СВКВ на основе адаптивного управления.

Адаптивная идентификация является составной частью контура управления системой и рассматривается как адаптивная идентификация в реальном масштабе времени. Системная модель позволяет разрабатывать взаимосвязанные математические описания отдельных элементов систем вентиляции и кондиционирования воздуха в целом. Она инвариантна к процессам, алгоритмам и структурам, подвергаемым описанию.

Полученные результаты анализа эффективности внедрения программируемого логического контроллера с реализованными в нем математическими моделями [10] являются подтверждением того, что использование методов математического моделирования для управления процессами воздухообмена позволяет построить модель, адекватную реальности, и является эффективным средством достижения сбережения энергетических и денежных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Energy Outlook 2016, International Energy Agency. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2016/> (дата обращения: 16.04.2017).
2. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: СанПиН 2.2.4.548-96 от 1.10.1996.
3. Блюмин С.Л., Правильникова В.В. Применение математического моделирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении плавательного бассейна // Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. 2013. № 4. С. 108–111.
4. Ананьев В.А. Системы вентиляции и кондиционирования. М.: Евроклимат, 2001. 567 с.

5. *Сотников А.Г.* Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. СПб.: «Береста», 2013. Т. 1. 423 с.
6. Инженерные системы зданий и сооружений. Теплогазоснабжение и вентиляция: учебник для вузов / под ред. Е.М. Авдолимова. М: Академия, 2014. 320 с.
7. *Шмырин А.М., Карабутов Н.Н.* Окрестностные системы: идентификация и оценка состояния. Липецк: ЛЭГИ, 2005. 132 с.
8. *Блюмин С.Л., Шмырин А.М.* Окрестностные системы. Липецк: ЛЭГИ, 2005. 132 с.
9. *Шмырин А.М., Ярцев А.Г., Семина В.В.* Трилинейная окрестностная модель процесса формирования температуры смотки горячекатаной полосы // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 2. С. 463–469.
10. *Блюмин С.Л., Семина В.В.* Моделирование микроклимата в производственном помещении // Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. 2016. № 1 (35). С. 117–120.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00854\_а).

Поступила в редакцию 11 мая 2017 г

Шмырин Анатолий Михайлович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Семина Валерия Владимировна, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, ассистент кафедры высшей математики, e-mail: pravilnik@mail.ru

Трофимов Евгений Павлович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, магистрант, физико-технологический факультет, e-mail: trofimovep@list.ru

UDC 51-74

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-3-605-610

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE NEIGHBORHOOD MODEL OF AIR EXCHANGE PROCESS IN THE INDUSTRIAL PREMISE

© A. M. Shmyrin, V. V. Semina, E. P. Trofimov

Lipetsk state technical university  
30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russian Federation, 398600  
E-mail: amsh@lipetsk.ru, pravilnik@mail.ru, trofimovep@list.ru

A system of automatic climate control was considered in the industrial premise: rotary kiln remote plant control room. To control the air conditioning system, a mathematical model of the microclimate with the use of neighborhood systems was constructed, which makes it possible to achieve resource saving and to ensure microclimate parameters corresponding to the norms.

*Key words:* mathematical modeling; neighborhood model; adaptive identification; energy saving; automatic control systems

## REFERENCES

1. World Energy Outlook 2016, International Energy Agency. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2016/> (accessed 16.04.2017)
2. Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises: SanPiN 2.2.4.548-96 dated 1.10.1996.
3. *Blyumin S.L., Pravilnikova V.V.* Primeneniye matematicheskogo modelirovaniya v sistemakh ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh v pomeshchenii plavatel'nogo basseyna // *Ekologiya Tsentralno-Chernozemnoy oblasti Rossiyskoy federatsii*. 2013. № 4. P. 108–111.
4. *Ananyev V.A.* Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. M.: Yevroklimat, 2001. 567 p.
5. *Sotnikov A.G.* Proyektirovaniye i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh. SPb.: «Beresta», 2013. T. 1. 423 p.
6. Inzhenernyye sistemy zdaniy i sooruzheniy. Teplogazosnabzheniye i ventilyatsiya: uchebnik dlya vuzov / pod red. Ye.M. Avdolimova. M.: Akademiya, 2014. 320 p.
7. *Shmyrin A.M., Karabutov N.N.* Okrestnostnyye sistemy: identifikatsiya i otsenka sostoyaniya. Lipetsk: LEGI, 2005. 132 p.
8. *Blyumin S.L., Shmyrin A.M.* Okrestnostnyye sistemy. Lipetsk: LEGI, 2005. 132 c.
9. *Shmyrin A.M., Yartsev A.G., Semina V.V.* Trilineynaya okrestnostnaya model' protsessa formirovaniya temperatury smotki goryachekatanoy polosy // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. Tambov, 2016. T. 21. Vyp. 2. S. 463–469.
10. *Blyumin S.L., Semina V.V.* Modelirovaniye mikroklimata v proizvodstvennom pomeshchenii // *Ekologiya Tsentral'no-Chernozemnoy oblasti Rossiyskoy Federatsii*. 2016. № 1 (35). S. 117–120.

ACKNOWLEDGEMENTS: The present research is supported by the Russian Fund for Basic Research (project № 16-07-00854\_a).

Received 11 May 2017

Shmyrin Anatoliy Mihaylovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Doctor of technical sciences, Professor, Head of Mathematics Department, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Semina Valeriya Vladimirovna, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Lecturer, Mathematics Department, e-mail: pravilnik@mail.ru

Trofimov Evgeniy Pavlovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Master's student, Physics and Technology Faculty, e-mail: trofimovep@list.ru

## Информация для цитирования:

*Шмырин А.М., Семина В.В., Трофимов Е.П.* Параметрическая идентификация окрестностной модели процесса воздухообмена в производственном помещении // *Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки*. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 3. С. 605–610. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-3-605-610

*Shmyrin A.M., Semina V.V., Trofimov E.P.* Parametricheskaya identifikatsiya okrestnostnoy modeli protsessa vozdukhobmena v proizvodstvennom pomeshchenii [Parametric identification of the neighborhood model of air exchange processes in the industrial premise]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki - Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 605–610. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-3-605-610 (In Russian)