УДК 51.74

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ И ФИЛЬТРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ОКРЕСТНОСТНЫХ СИСТЕМ**

***Сёмина В.В., Мишачев Н.М., Шмырин А.М.***

*Россия, г. Липецк, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)*

*Рассмотрена актуальная задача разработки и системного анализа новых классов слабосвязанных окрестностных моделей, описывающих сложные производственные процессы. В качестве примера описана окрестностная модель системы вентиляции и фильтрации воздуха в цехе обжига цементного клинкера. Предложен алгоритм декомпозиции окрестностной структуры двойной системы, позволяющий значительно уменьшить количество идентифицируемых параметров модели. В контексте алгоритма декомпозиции рассмотрены задачи управления двойными слабосвязанными системами и задачи их оптимизации. Преимуществом использования слабосвязанных окрестностных систем является сокращение размерности задачи параметрической идентификации, а также возможность найти оптимальный режим управления микроклиматом в производственном помещении, позволяющий снизить расход электроэнергии.*

*Ключевые слова: окрестностная структура, окрестностная система, слабосвязанные системы, энергосбережение, структурная идентификация, параметрическая идентификация.*

Одним из перспективных направлений решения задач структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем является окрестностное моделирование систем управления. Синтез окрестностной модели сложного производственного объекта или процесса основан, как правило, на системном анализе связей между составляющими его частями или узлами. Особенностью использования метода окрестностного моделирования для описания достаточно сложных объектов является наличие большого количества параметров (коэффициентов) синтезируемой системы управления, подлежащих идентификации. Поскольку, соответственно, для идентификации в таком случае требуется много данных, актуальной является задача поиска возможностей уменьшения числа параметров. В работе данная задача решается для окрестностных моделей двух слабосвязанных процессов.

Под окрестностной структурой понимается орграф с наборами переменных в вершинах. Окрестностная система – это система уравнений, соответствующих вершинам окрестностной структуры, при этом входящие дуги задают множество переменных, участвующих в уравнении.

В работах [1, 2] введен термин «параллельные» окрестностные системы, описывающий две окрестностные системы, которые заданы над одной окрестностной структурой, а также термин «слабосвязанные» параллельные окрестностные системы, определяющий системы, в которых количество глобальных переменных можно считать малым по смыслу рассматриваемой задачи. Для формализации определения введено понятие мультииндекса двойной системы [1]. На основе рассмотрения примеров абстрактных систем можно сказать, что наличие порядка 30% глобальных переменных делает возможным сокращение количества идентифицируемых параметров примерно в 2 раза в линейном случае.

В процессе производства цемента в связи с неоптимальной работой системы аспирационно-обеспыливающей вентиляции в цехе обжига цементного клинкера существует проблема превышения допустимой концентрации пыли в цехе и в окружающей среде. Очистка воздуха от пыли осуществляется с помощью электрофильтров, что вносит существенную долю в расход электроэнергии наряду с кондиционированием воздуха. В зависимости от типа системы фильтрации ее эффективность составляет 70-95 %.

В производственном помещении необходимо обеспечить соответствующий СанПиН микроклимат, который способствует повышению работоспособности персонала, для этого следует оптимально организовать работу системы вентиляции, фильтрации и кондиционирования.

Достичь энергосбережения системы вентиляции и максимальной производительности вращательных цементных печей возможно путем нахождения оптимальных режимов работы для системы вентиляции, фильтрации и кондиционирования воздуха, которая связана с технологическим процессом, а именно в данной задаче с процессом обжига клинкера.

Рассмотрим окрестностную структуру системы управления производственной вентиляцией и фильтрацией воздуха в помещении, в воздух рабочей зоны которого могут выделяться вредные вещества. Этот процесс включает фильтрацию воздуха от пыли и кондиционирование воздуха (нагрев/охлаждение воздуха), поэтому соотв. окрестностную систему можно считать двойной.

В простом случае окрестностная структура состоит из четырёх узлов – вершин ориентированного графа, из которых три узла состояния (обозначены кругами на рисунке 1) и один узел входа и выхода (обозначены квадратами). Ориентированные рёбра графа соответствуют материальным потокам (воздух) и информации.



***Рисунок 1 – Окрестностная структура системы управления
производственной вентиляцией и фильтрацией***

 Верхние индексы переменных *t* и *d* соответствуют температуре и содержанию пыли, индекс *f* связан с приточной вентиляцией и фильтрацией воздуха. Входы Ext1, Ext2 – неуправляемые, Reg1, Reg2 – управляемые. Вершины, их тип и переменные – приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Описание вершин окрестностной структуры*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вершина | Тип | Переменные |
| Ext1  | Вход | *De* – концентрация пыли в приточном воздухе, *Te* – температура приточного воздуха. |
| Cond  | Узел | *Dc* – концентрация пыли после фильтрации, *Tc* –температура воздуха,  – расход энергии в единицу времени на фильтрацию, – расход энергии в единицу времени на кондиционирование воздуха. |
| Plant  | Узел | *Tp* – установившаяся температура в цехе, *Dp* – установившаяся концентрация пыли в цехе. |
| Filt  | Узел | *Df* – концентрация пыли после фильтрации,*Tf* – температура воздуха после фильтрации,*Ef* – расход энергии в единицу времени на вытяжку и фильтрацию. |
| Ext2 | Вход | *N t* – интенсивность тепловыделения (глобальная переменная),*N d* – интенсивность пылеобразования (глобальная переменная) |
| Reg1, Reg2 | Вход | *Vf* –объем кондиционируемого воздуха в единицу времени (глобальная переменная), *R* – коэффициент рециркуляции (глобальная переменная). |
| Exit | Выход | *Df* – концентрация пыли после фильтрации,*Tf* – температура воздуха после фильтрации. |

В данном исследовании сначала определим переменные управления, оставшиеся переменные будут состояниями. Если значение переменной может быть изменено «поворотом регулятора», то данная переменная имеет тип «управление». В задаче окрестностного моделирования системы управления микроклимата управлениями будут являться переменные , , *Ef*  и *R*.

С другой стороны в качестве управлений вместо переменных , , *Ef*  можно взять переменные *Тc*, *Dc*, *Df*,, учитывая простейшие обратные связи ,  и , которые реализованы физическими устройствами. Принимая во внимание более длинные обратные связи, переменные *Тр* или *Dр* можно определить как управления, также это возможно и с другими переменными. Некоторые из переменных не могут быть определены как переменные управления, а именно *Те*, *Dе*, *Nt*, *Nd* и *N*. Все они являются переменными состояния.

Интенсивность тепловыделения *Nt* и интенсивность пылеобразования *Nd* являются внешними входами и не управляемыми, но в глобальном смысле в эти переменные управляемы в иерархической окрестностной структуре производства.

Применим к данной системе алгоритм декомпозиции и агрегирования, описанный в [2]. В результате получим структуру на рисунке 2 из двух слабосвязанных систем 1 – фильтрации и 2 – вентиляции, которые связаны только по управлениям *Vf* и *R* и по критерию оптимальности *Е*, представленном на плакате.



***Рисунок 2 – Декомпозиция и агрегирование окрестностной системы***

В структуру, представленную на рисунке 2 введем еще один узел *Е*, характеризующий критерий оптимальности для системы вентиляции, кондиционирования и фильтрации воздуха:



На данном этапе системного анализа целью является упрощение системы на абстрактном уровне. В процессе структурной идентификации системы, описывающей два слабосвязанных процесса, необходимо выполнить декомпозицию – представление системы в виде двух слабосвязанных систем. В этой декомпозиции мы фактически имеем дело не с системами уравнений (так как они еще не сформулированы), а с окрестностной структурой процесса и пытаемся разделить процесс, моделируемый этой структурой, на два слабосвязанных. В частности, на этом этапе нужно разделить все переменные на локальные и глобальные. Это наиболее трудная и, как правило, не формализуемая часть задачи, даже в тех случаях, когда наличие параллельных процессов не вызывает сомнений.

В линейной реализации нерасщеплённой окрестностной системы [1], представленной на рисунке 1, содержится 82 коэффициента, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации. В расщеплённой системе или, точнее, в двух слабосвязанных системах [1] количество таких коэффициентов уменьшается до 49.

В билинейном случае количество параметров до декомпозиции составит – 427, после – 102 (1 подсистема) и 48 (2 подсистема), т.е. всего 150 параметров после декомпозиции. Таким образом, предложенный алгоритм декомпозиции и агрегирования сократит количество идентифицируемых параметров почти в 3 раза в билинейном случае.

В рамках теории окрестностных систем никаких ограничений на тип уравнений не существует, но обычно рассматриваются линейные или билинейные уравнения.

Далее использование простых физических соображений позволило дополнительно сократить количество уравнений в слабосвязанных системах после декомпозиции [2] и конкретизировать трилинейную аналитическую модель, в которой количество идентифицируемых параметров уменьшилось до 9. На данном этапе была учтена информация, связанная с физическим смыслом уравнений, а именно: использовано уравнение баланса объемов приточного и удаляемого воздуха; *Dp*, *Df*, *Dc* удалось объединить в одно уравнение, введением новой переменной для первой подсистемы; *Tp* и *Tc* объединили в одно уравнение для второй подсистемы; уравнение *Tf* для примера цементного производства (и других подобных) можно не использовать, так как для удаляемого воздуха важно только его пылесодержание, но не температура.

Идентифицируем разработанные окрестностные модели слабосвязанных подсистем вентиляции и фильтрации для задачи управления микроклимата цеха обжига клинкера АО «ЛипецкЦемент» по экспериментальным данным за календарный год. Модели для каждого сезона наилучшим образом соответствуют сезонным изменениям погоды, в качестве примера рассмотрим модели для летнего периода.

Модель фильтрации:



Модель вентиляции:



Средняя ошибка аппроксимации для каждого уравнения сезонных моделей приведена в таблице 2, она не превышает установленных производством требований и свидетельствует о хорошем качестве моделей.

*Таблица 2 – Средняя ошибка аппроксимации для моделей*

|  |  |
| --- | --- |
| Сезон | Средняя ошибка аппроксимации, % |
| $$E\_{f}$$ | $$D\_{p}$$ | $$E\_{c}^{f}$$ | $$T\_{p}$$ | $$E\_{c}^{t}$$ |
| Зимний | 0,855 | 0,147 | 0,905 | 0,246 | 1,05 |
| Весенний | 0,698 | 0,647 | 0,878 | 0,274 | 0,974 |
| Летний | 0,885 | 0,564 | 0,877 | 0,244 | 0,989 |
| Осенний | 0,789 | 0,598 | 0,606 | 0,206 | 0,62 |

Решим задачу поиска минимума функции суммарных затрат электроэнергии в области определения ее аргументов с помощью градиентных численных методов в математическом пакете PTC MathCAD.

На основе оптимальных управлений *Vf* и *R* рассчитано оптимальное энергопотребление, график которого представлен на рисунке 3.

***Рисунок 3 – График общего расхода энергии и фактических данных (Квт∙ч)***

Суммарные значения энергозатрат за сезон приведены в таблице 3. Процент экономии составил порядка 3% за сезон, что в экономическом плане на дату расчетов эквивалентно 1,5 млн. руб.

*Таблица 3 – Экономия электроэнергии с использованием окрестностных моделей*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Сезон | Фактическое значение, кВт∙ч | Рассчитанное значение, кВт∙ч | Процент экономии электроэнергии, % |
| Е | Е | Е | $$E\_{f}$$ | $$E\_{c}^{f}$$ | $$E\_{c}^{t}$$ |
| Зимний | 10815264 | 10492860 | 2,981 | 3,671 | 5,146 | 3,015 |
| Весенний | 886959 | 858612 | 3,196 | 4,449 | 4,489 | 3,590 |
| Летний | 9189215 | 8938257 | 2,731 | 4,945 | 4,852 | 3,251 |
| Осенний | 861484 | 834614 | 3,119 | 4,596 | 4,146 | 3,146 |

Данные результаты показывают, что применение окрестностного подхода к моделированию и решению задачи оптимизации энергопотребления системой вентиляции и фильтрации воздуха позволяет достичь большего эффекта энергосбережения, чем построение математических моделей согласно только физическим законам [3] без выделения слабосвязанных параллельных подсистем.

**Выводы**

Определены перспективы реализации предложенного алгоритма структурного преобразования окрестностных моделей слабосвязанных процессов, позволяющего уменьшить количество идентифицируемых параметров модели.

Создана окрестностная система управления микроклиматом производственного помещения, разработанная на примере цеха обжига клинкера цементного предприятия, с целью оптимизации энергопотребления и экологических характеристик технологического процесса.

Выполнена параметрическая идентификация окрестностных моделей слабосвязанных процессов вентиляции и фильтрации по экспериментальным данным АО «ЛипецкЦемент».

Рассмотрен достаточно энергоемкий сложный процесс обжига клинкера, для системы управления вентиляцией и фильтрации в цехе решена задача минимизации суммарных затрат энергопотребления с помощью градиентных численных методов, найдены оптимальные управления, позволяющие достичь энергосбережения, сохраняя в норме показатели микроклимата.

Список литературы

1. Сёмина, В.В. Идентификация слабосвязанных окрестностных систем / В.В. Сёмина // Вестник ВГТУ. 2019. № 2. С. 69-75.

2. Semina, V.V. Weakly Connected Neighborhood Systems / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia, 2019. pp. 1-6.

3. Правильникова, В.В. Автоматизированная система управления вентиляцией в помещении плавательного бассейна / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин, П.В. Сараев, А.К. Погодаев // Сборник материалов X Международной научно-практической интернет-конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК ", 15 марта - 30 июня 2012. Орел: ОрГТУ, 2012. C. 16-19.

**Сёмина Валерия Владимировна,** старший преподавателькафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. Е-mail: pravilnik@mail.ru

**Шмырин Анатолий Михайлович,** доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. Е-mail: amsh@mail.ru

**Мишачев Николай Михайлович,** кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. Е-mail: nmish@lipetsk.ru

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

UDC 51.74

**COMPLEX INVESTIGATIONSOF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF DEPOSITIONOF DIFFERENT HEAT-RESISTANT LAYERS FOR HEAT-STRENGTHED DETAILS OF GTE TURBINS**

***Semina V.V., Shmyrin A.M., Mishachev N.M.***

*Russia, Moscow, Lipetsk State Technical University (LSTU)*

*The actual problem of developing new classes of models based on the neighborhood approach, which describe complex production processes, is considered. As an example, a neighborhood model of the ventilation and air filtration system in the cement clinker firing workshop is described. An algorithm for the decomposition and of the neighborhood structure of a binary system is proposed, which makes it possible to significantly reduce the number of identifiable parameters of the model. The problems of control of double weakly coupled systems and problems of their optimization using the decomposition algorithm are considered. The advantage of using loosely coupled neighborhood systems is the reduction of the dimension of the parametric identification problem, also the ability to find the optimal microclimate control mode in the production premises, which allows to reduce energy consumption.*

*Key words: neighborhood structure, neighborhood system, loosely coupled systems, energy saving, structural identification, parametric identification.*

Bibliography

1. Semina, V.V. Identification of weakly connected neighborhood systems / V.V. Semina // Bulletin of VSTU. 2019. № 2. P. 69-75.

2. Semina, V.V. Weakly Connected Neighborhood Systems / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia, 2019. pp. 1-6.

3. Pravilnikovа, V.V. Automated ventilation control system in the swimming pool premises / V.V. Pravilnikova, S.L. Blumin, P.V. Saraev, A.K. Pogodaev // Proceedings of the X International Scientific and Practical Internet Conference "ENERGY AND RESOURCE SAVINGS - XXI CENTURY", March 15 - June 30, 2012. Oryol: OrGTU, 2012. pp. 16-19.

**Semina Valeria Vladimirovna**, senior lecturer of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. Е-mail: pravilnik@mail.ru

**Shmyrin Anatoly Mikhailovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. Е-mail: amsh@mail.ru

**Mishachev Nikolai Mikhailovich**, Ph.D, associate professor of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. Е-mail: nmish@lipetsk.ru