

## АГРЕГИРОВАНИЕ ОКРЕСТНОСТНЫХ СИСТЕМ В МОДЕЛИ ВЕНТИЛЯЦИИ ЦЕХА ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© А. М. Шмырин, Н. М. Мишачев, В. В. Семина

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

В статье рассматривается пример агрегирования (объединения) окрестностных систем в задаче математического моделирования системы вентиляции цеха цементного производства. Целью моделирования является оптимизация работы системы вентиляции по критериям энергозатрат и экологичности.

*Ключевые слова:* окрестностные структуры; окрестностные системы; идентификация; декомпозиция; агрегирование

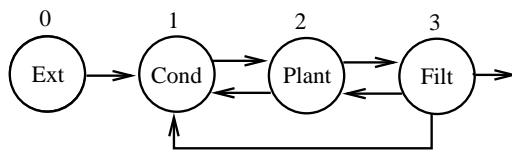
### Введение

В данной статье мы обсуждаем задачу структурной идентификации окрестностной модели системы вентиляции цеха цементного производства. Мы описываем работу систем фильтрации и терморегуляции и затем агрегируем (объединяем) полученные модели с учетом возможных взаимодействий. Предлагаемая модель является упрощенной и рассматривается как базовая для дальнейших уточнений и дополнений. В частности, здесь мы не учитываем влияние влажности воздуха и рассматриваем только две его характеристики: температуру и концентрацию пыли. В данной базовой версии узлы модели частично кластеризованы и, кроме того, мы не включаем в окрестностную структуру узлы, соответствующие дополнительной подсистеме вентиляции частично изолированного помещения пункта управления, находящегося в цехе. Еще одним упрощением является рассмотрение статической модели, соответствующей установившемуся режиму и, соответственно, установившимся значениям всех переменных. Структурная идентификация уравнений системы основана на достаточно простых физических соображениях, приводящих к кусочно-трилинейным зависимостям. Предполагается, что в процессе функционирования системы вентиляции можно получать экспериментальные данные, необходимые для параметрической идентификации коэффициентов модели. В последнем пункте статьи обсуждается программа дальнейшей детализации модели.

### 1. Окрестностная структура системы вентиляции.

*Окрестностная структура* (см. [1]–[3]) системы вентиляции цеха цементного производства в упрощенном базовом варианте изображена на рисунке ниже и состоит из следующий узлов (вершин):

- (0) «Ext» – приточный воздух;
- (1) «Cond» – фильтрация и терморегуляция приточного воздуха;
- (2) «Plant» – производственный цех, нагрев воздуха и пылеобразование;
- (3) «Filt» – вытяжка и фильтрация воздуха перед удалением и рециркуляцией.



Заметим, что стрелки (ориентированные ребра)  $0 \rightarrow 1$  и  $3 \rightarrow 1$  соответствуют материальным потокам (воздух), стрелки  $1 \rightarrow 2$  и  $2 \rightarrow 3$  – материальным потокам (воздух) и информации, стрелки  $2 \rightarrow 1$  и  $3 \rightarrow 2$  – информации.

## 2. Переменные.

Далее вместо номеров узлов окрестностной структуры мы используем мнемонические обозначения узлов первыми буквами их названий:  $0 \sim e$ ,  $1 \sim c$ ,  $2 \sim p$ ,  $3 \sim f$ . Буквенные обозначения удобны для дальнейших дополнений базовой модели новыми узлами. В окончательной версии, перед программированием, имеет смысл вернуться к числовым обозначениям.

В нашем базовом приближении функционирование системы описывается следующими переменными:

Узел «Ext» –  $D_e$ ,  $T_e$  – концентрация пыли (dust) в приточном воздухе и его температура.

Узел «Cond» –  $V_c$ ,  $D_c$ ,  $T_c$ ,  $E_c^f$ ,  $E_c^t$  – объем приточного воздуха в единицу времени, максимальная концентрация пыли в воздухе после фильтрации, температура воздуха после терморегуляции, расход энергии в единицу времени на фильтрацию (точнее приток+фильтрацию) и терморегуляцию.

Узел «Plant» –  $T_p$ ,  $D_p$ ,  $N$ ,  $N^t$ ,  $N^d$  – установившиеся температура и концентрация пыли в цехе, интенсивность производства, интенсивности тепловыделения и пылеобразования.

Узел «Filt» –  $V_f$ ,  $D_f$ ,  $E_f$ ,  $R$  – объем фильтруемого воздуха в единицу времени, концентрация пыли после фильтрации, расход энергии в единицу времени на фильтрацию (точнее вытяжка+фильтрацию), коэффициент рециркуляции.

Как и в случае нумерации узлов, мы используем для всех переменных мнемоническую систему обозначений вместо универсальных обозначений  $X$  и  $U$  для состояний и управлений.

Все величины измеряются в единицах системы СИ; интенсивность производства цемента – в кг/сек,  $R \in [0, 1]$  – безразмерный коэффициент, равный отношению объема возвращаемого воздуха ко всему объему фильтрованного воздуха.

## 3. Классификация переменных.

Разделение переменных на *состояния* и *управления* часто зависит от решаемой задачи. Если считать управлениями переменные, значения которых изменяются «поворотом ручки», то в нашем случае это  $E_c^f$ ,  $E_c^t$ ,  $E_f$  и  $R$ . Все остальные переменные можно считать состояниями. Простейшие обратные связи  $E_c^t \bowtie T_c$ ,  $E_c^f \bowtie D_c$  и  $E_f \bowtie D_f$ , реализованные физическими устройствами, позволяют рассматривать в качестве управлений, вместо переменных  $E_c^f$ ,  $E_c^t$  и  $E_f$ , переменные  $T_c$ ,  $D_c$  и  $D_f$ . Более длинные обратные связи позволяют сделать управлениями и другие переменные, например  $T_p$  или  $D_p$ . С другой стороны, некоторые из переменных являются «чистыми» состояниями, т. е. не могут рассматриваться как управления. В нашем случае это  $T_e$ ,  $D_e$ ,  $N^t$ ,  $N^d$  и  $N$ .

Можно еще разделить переменные на *внешние*, независимые от работы системы, и *внутренние*, зависящие от работы системы. В отличие от дихотомии «состояния-управления» такое

разделение является однозначным. В рассматриваемой модели внешними переменными являются  $T_e$ ,  $D_e$ ,  $N^t$ ,  $N^d$  и  $N$ , все остальные – внутренние. Разделение переменных на внешние и внутренние удобно при иерархическом моделировании, когда некоторые из внешних параметров становятся внутренними в объемлющей (старшей по иерархии) модели. Например, в нашем случае интенсивности  $N^t$ ,  $N^d$  и  $N$  будут внутренними переменными в объемлющей модели цементного производства. Заметим, что «чистые» состояния обычно являются внешними переменными и наоборот.

#### 4. Ограничения и уравнение баланса.

Внутренние переменные, как состояния так и управления, обычно должны удовлетворять некоторым технологическим ограничениям. В нашем случае

$$\begin{aligned} T_c &\in [T_c^{\min}, T_c^{\max}], \quad T_p \in [T_p^{\min}, T_p^{\max}], \\ D_c &\leq D_c^{\max}, \quad D_p \leq D_p^{\max}, \quad D_f \leq D_f^{\max}, \\ E_c^f &\leq E_c^{\max}, \quad E_c^t \leq E_c^{\max}, \quad E_f \leq E_f^{\max}. \end{aligned}$$

Некоторые из этих ограничений могут зависеть от внешних переменных. Например, ограничения на  $T_*$  и  $D_*$  (температуры и концентрации пыли) могут зависеть от влажности приточного воздуха  $H_e$ , которую мы на данном этапе не учитываем. Значение  $D_f^{\max}$  определяется экологическими нормами и, вообще говоря, зависит от погодных условий: влажности воздуха, направления и сила ветра и т.п. Если вместо концентрации  $D_f^{\max}$  задано ограничение  $D_V^{\max}$  на количество пыли, выбрасываемой за единицу времени, то  $D_f^{\max} = D_V^{\max} / [(1 - R) V_f]$ . Укажем еще очевидное уравнение баланса, связывающее объемы приточного и удаляемого воздуха:

$$V_c + R V_f = V_f \quad \text{или} \quad V_c = (1 - R) V_f. \quad (1)$$

В более подробной модели уравнение баланса (1) будет иметь вид  $V_c = (1 - R) V_f + V_{ext}$ , где  $V_{ext}$  – дополнительная утечка воздуха. Уравнение баланса позволяет в дальнейшем исключать из уравнений переменную  $V_c$ .

#### 5. Задачи оптимизации.

Целью нашей математической модели является оптимальное управление системой вентиляции. Это означает, что все контролируемые переменные должны находиться в заданных пределах, энергозатраты

$$E = E_c + E_f = E_c^f + E_c^t + E_f \quad (2)$$

должны быть минимальны, а интенсивность производства  $N$  – максимальна. Но, как уже было отмечено,  $N$  является внешней переменной и связывает нашу модель с полной моделью цементного производства, в которую модель вентиляции должна быть иерархически вложена. По этой причине в рамках модели вентиляции имеет смысл оптимизировать (минимизировать) только энергозатраты  $E = E_c + E_f$  при фиксированной  $N$ . Можно еще поставить задачу минимизации, при фиксированной интенсивности  $N$ , «экологического» функционала

$$E^2(k) = (1 - k) \left( \frac{E}{E_n} \right)^2 + k \left( \frac{(1 - R) V_f D_f}{D_V^n} \right)^2 = (1 - k) \left( \frac{E}{E_n} \right)^2 + k \left( \frac{D_f}{D_f^n} \right)^2, \quad (3)$$

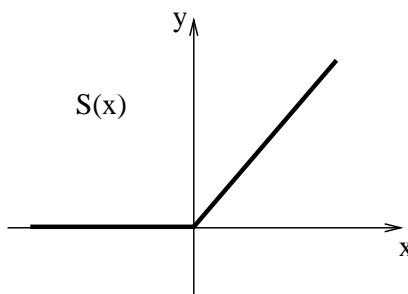
где  $E_n$  – номинальное значение энергозатрат,  $D_V^n$  – номинальное допустимое количество пыли, выбрасываемой за единицу времени,  $D_f^n$  – номинальная интенсивность выброса пыли и  $k \in [0, 1]$  – выбираемый коэффициент. Возведение в квадрат слагаемых во втором функционале связано со следующим обстоятельством: если обе дроби зависят линейно от варьируемых

параметров, то в линейной версии, без возведения в квадрат, минимум будет достигаться при минимуме либо первого либо второго слагаемого, поскольку сумма линейных функций линейна. В этом случае линейный экологический функционал не обеспечивает желаемого баланса между экологичностью и энергозатратами.

## 6. Декомпозиция.

В этом пункте мы построим отдельные модели для работы системы вентиляции в следующих режимах: а) без нагрузки, б) в режиме фильтрации и с) в режиме терморегуляции. Мы будем обозначать коэффициенты в уравнениях моделей а), б) и с) через  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно. Эти коэффициенты снабжаются нижними буквенными индексами по следующему правилу: первая буква соответствует началу стрелки окрестностной структуры и вторая – концу. Для коэффициентов, соответствующих взаимодействию переменных внутри одного узла, т. е. петлям (петли не изображенных на схеме выше), используется первая буква названия узла. В некоторых случаях коэффициенты снабжаются верхними буквенными индексами, которые имеют ясный из контекста мнемонический смысл. Как и в случае обозначений узлов, в окончательном варианте модели, перед программированием, имеет смысл перейти к числовым обозначениям:  $\alpha_{01}$  вместо  $\alpha_{ec}$  и т.д.

Нам потребуется функция  $S(x) = \max(0, x)$ :



### a) Работа без нагрузки

Описываемая ниже модель не будет использована далее (при агрегировании) и мы обсуждаем ее в качестве полезного примера и в качестве базовой модели для подсистемы вентиляции изолированного пункта управления.

В режиме без нагрузки ( $N = 0$ ) система вентиляции нормализует параметры  $T_e$  и  $D_e$  приточного воздуха до параметров  $T_c$  и  $D_c$ , при этом  $T_p = T_c$ ,  $D_c = D_p = D_f$  и  $E_f = 0$ . Очевидно, что оптимальным является режим полной рециркуляции  $R = 1$ ,  $V_c = V_f$ . Для энергозатрат на фильтрацию и поддержание заданной температуры  $T_c$  мы получаем кусочно-билинейные уравнения

$$E_c^f = \alpha_{ec}^d V_c S(D_e - D_c) + \alpha_{ec}^v V_c \quad (4)$$

$$E_c^t = \alpha_{ec}^t V_c |T_e - T_c| \quad (5)$$

Здесь в уравнении (4) два слагаемых соответствуют расходу энергии на фильтрацию и на приток. Первое слагаемое равно нулю, если приточный воздух достаточно чистый:  $D_e \leq D_c$ . Уравнение (5) соответствует компенсации теплообмена цеха Plant с окружающей средой. Неизвестные коэффициенты  $\alpha_{ec}^d$ ,  $\alpha_{ec}^v$  и  $\alpha_{ec}^t$  определяются экспериментально (параметрическая идентификация). Коэффициент  $\alpha_{ec}^t = \alpha_{ec}^t(\pm)$ , вообще говоря, может зависеть от знака разности  $T_e - T_c$ , т. е. от того, как работает система терморегуляции: на охлаждение («лето»,  $T_e > T_c$ ) или на обогрев («зима»,  $T_e < T_c$ ).

## b) Работа в режиме фильтрации

При интенсивности пылеобразования  $N^d$  простейшая модель работы системы в режиме фильтрации (приток+фильтрация+вытяжка+фильтрация) описывается следующими уравнениями:

$$D_p = \hat{D}_c + \beta_p N^d - \beta_{fp} V_f \quad (6)$$

$$E_f = \beta_{pf}^d V_f (D_p - D_f) + \beta_{pf}^v V_f \quad (7)$$

$$E_c^f = \beta_{ec}^d [V_c S(D_e - D_c) + R V_f S(D_f - D_c)] + \beta_{ec}^v V_f \quad \text{или}$$

$$E_c^f = \beta_{ec}^d V_f [(1 - R) S(D_e - D_c) + R S(D_f - D_c)] + \beta_{ec}^v V_f \quad (8)$$

Линейное уравнение (6) описывает баланс количества пыли в Plant, кусочно-билинейное уравнение (7) – расход энергии на вытяжку и фильтрацию воздуха в Filt, кусочно-трилинейное уравнение (8) – расход энергии на фильтрацию смеси приточного и возвращенного воздуха и на приток воздуха в Cond. Для вывода уравнения (8) было использовано уравнение баланса (1). Переменная  $\hat{D}_c$  – это концентрация пыли после фильтрации смеси приточного и рециркуляционного воздуха до уровня  $D_c$ . Равенство  $\hat{D}_c = D_c$  выполняется в случае, когда  $D_c \leq D_e$  и  $D_c \leq D_f$ . В общем случае  $\hat{D}_c \leq D_c$  и, как нетрудно проверить,  $\hat{D}_c$  вычисляется по формуле

$$\hat{D}_c = (1 - R) \min\{D_c, D_e\} + R \min\{D_c, D_f\}. \quad (9)$$

Неизвестные коэффициенты  $\beta_p$ ,  $\beta_{fp}$ ,  $\beta_{pf}^d$ ,  $\beta_{pf}^v$ ,  $\beta_{ec}^d$  и  $\beta_{ec}^v$  определяются экспериментально (параметрическая идентификация). Коэффициент  $\beta_{ec}^d$  совпадает с коэффициентом  $\alpha_{ec}^d$  из первой модели, поскольку эти коэффициенты относятся к одному и тому же фильтрующему устройству. Коэффициенты  $\beta_{ec}$  и  $\beta_{pf}^d$  могут не совпадать, поскольку они относятся к разным устройствам фильтрации.

## c) Работа в режиме терморегуляции

При интенсивности тепловыделения  $N^t$  простейшая модель работы системы в режиме терморегуляции описывается следующими уравнениями:

$$T_p = T_c + \gamma_p N^t - \gamma_{fp} V_f \quad (10)$$

$$E_c^t = \gamma_{ec} |(V_c (T_e - T_c) + R V_f (T_p - T_c))| \quad \text{или}$$

$$E_c^t = \gamma_{ec} V_f |(1 - R) (T_e - T_c) + R (T_p - T_c)| \quad (11)$$

Линейное уравнение (10) описывает баланс тепла в Plant, кусочно-трилинейное уравнение (11) – расход энергии на терморегуляцию смеси приточного и возвращенного воздуха в Cond. Для вывода уравнения (11) было использовано уравнение баланса (1). Коэффициент  $\gamma_{ec}$  совпадает с коэффициентом  $\alpha_{ec}^t$  из первой модели (работы без нагрузки), поскольку эти коэффициенты относятся к одному и тому же устройству терморегуляции. Неизвестные коэффициенты  $\gamma_p$ ,  $\gamma_{fp}$  и  $\gamma_{ec}$  определяются экспериментально (параметрическая идентификация).

**7. Агрегирование систем.**

Уточним наше понимание термина «агрегирование» (часто используемого в системном анализе). В иерархической системе помимо вертикальных (иерархических) связей могут быть горизонтальные связи между подсистемами одного уровня. По вертикальным (иерархическим) связям общие переменные передаются, в зависимости от решаемой задачи, либо сверху вниз (во всей системе), либо снизу вверх (также во всей системе). Направление передачи общих переменных по горизонтальным связям, вообще говоря, может изменяться в зависимости от

значений других переменных. Агрегированием мы называем объединение нескольких подсистем одного уровня с указанием текущей (зависящей от ситуации) иерархии этих подсистем, определяющей направление передачи общих переменных.

Рассмотрим задачу агрегирования моделей фильтрации и терморегуляции в общую модель вентиляции. Сделаем вначале одно упрощающее предположение. Измерение или оценка из физических соображений переменных  $N^t$  и  $N^d$  является трудной задачей. Обе переменные зависят от  $N$  и моделирование этой зависимости относится к объемлющей модели цементного производства. Если предположить, что  $N^t = k_t N$  и  $N^d = k_d N$ , т. е. что обе интенсивности пропорциональны общей интенсивности производства, то в уравнениях (6) и (10) можно заменить эти переменные на  $N$ . Тогда две системы уравнений (для фильтрации и терморегуляции) будут иметь вид

$$\begin{cases} D_p = \hat{D}_c + \beta_p N - \beta_{fp} V_f \\ E_f = \beta_{pf}^d V_f (D_p - D_f) + \beta_{pf}^v V_f \\ E_c^f = \beta_{ec}^d V_f [(1 - R) S(D_e - D_c) + R S(D_f - D_c)] + \beta_{ec}^v V_f \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_p = T_c + \gamma_p N - \gamma_{fp} V_f \\ E_c^t = \gamma_{ec} V_f |(1 - R)(T_e - T_c) + R(T_p - T_c)| \end{cases} \quad (13)$$

Системы (12) и (13) связаны через переменные  $R$ ,  $V_f$  и  $N$ , при этом переменная  $N$  – внешняя и в задачах оптимизации (2) и (3) она фиксирована. Формальное агрегирование, под которым мы понимаем совместное рассмотрение этих систем путем формального объединения в систему уравнений

$$\begin{cases} D_p = \hat{D}_c + \beta_p N - \beta_{fp} V_f \\ E_f = \beta_{pf}^d V_f (D_p - D_f) + \beta_{pf}^v V_f \\ E_c^f = \beta_{ec}^d V_f [(1 - R) S(D_e - D_c) + R S(D_f - D_c)] + \beta_{ec}^v V_f \\ T_p = T_c + \gamma_p N - \gamma_{fp} V_f \\ E_c^t = \gamma_{ec} V_f |(1 - R)(T_e - T_c) + R(T_p - T_c)| \end{cases} \quad (14)$$

возможно не во всех случаях. Это понятно, из физических соображений: и в (12) и в (13) критически важным является воздушный поток  $V_f$ , поскольку он удаляет пыль и охлаждает воздух в цехе, при этом необходимые интенсивности  $V_f^d$  и  $V_f^t$  могут быть разными. Математически это соответствует случаю, когда  $D_p$  и  $T_p$  заданы, а значения  $V_f$ , найденные из первых уравнений систем (12) и (13), не совпадают. Обобщенное (минимизирующее невязку) решение системы (14) в этом случае может оказаться технологически неприемлемым. Правильный алгоритм действий состоит в установлении текущей иерархии подсистем: нужно найти решение той из систем (12) или (13), у которой интенсивностью  $V_f$  больше, и затем искать обобщенное решение второй системы с заданным значением  $V_f$ . Уже на этом простом примере видно, что алгоритмизация процесса агрегирования подсистем может оказаться сложной задачей. В случае агрегирования линейных подсистем эта задача может быть решена с привлечением псевдообращения.

## 8. Предельный случай.

Рассмотрим, для примера, следующий полезный предельный случай: пусть  $D_e \leq D_c = D_f$  и  $T_e = T_c = 0$ . Первое условие означает, в частности, отсутствие фильтрации приточного воздуха для цеха и часто является достаточно хорошими приближением, поскольку  $D_p \gg D_e$ . Второе условие менее универсально и может рассматриваться в качестве приближения реже чем первое. В этих предположениях рециркуляция не имеет смысла ( $R = 0$ ). Далее мы будем считать,

что  $D_p = D_p^{max}$  и  $T_p = T_p^{max}$ . Этому, очевидно, соответствует максимальная интенсивность производства  $N$ . Системы (12) и (13) упрощаются до систем

$$\begin{cases} D_p^{max} = \beta_p N - \beta_{fp} V_f \\ E_f = \beta_{pf}^d V_f (D_p^{max} - D_f) + \beta_{pf}^v V_f \\ E_c^f = \beta_{ec}^v V_f \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_p^{max} = \gamma_p N - \gamma_{fp} V_f \\ E_c^t = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Из первых уравнений этих систем находим

$$V_f^d = \frac{1}{\beta_{fp}} (\beta_p N - D_p^{max}) \quad \text{и} \quad V_f^t = \frac{1}{\gamma_{fp}} (\gamma_p N - T_p^{max}). \quad (17)$$

Рассмотрим две возможности.

a)  $V_f^d > V_f^t$

В этом случае в первом уравнении второй системы левая и правая части – константы, причем правая часть меньше левой. Это означает, что фактическая температура  $T_p^{fact}$  в цехе будет меньше  $T_p^{max}$ , т. е. температурный режим будет более комфортным. Минимальные значения функционалов  $E$  и  $E^2(k)$  зависят от значения  $D_f$ . В частности, расход энергии минимален при  $D_f = D_f^{max}$ , а минимизация функционала  $E^2(k)$  сводится нахождению точки минимума  $D_f$  квадратичной функции.

b)  $V_f^d < V_f^t$

В этом случае в первом уравнении первой системы левая и правая части – константы, причем правая часть меньше левой. Это означает, что фактическая концентрация пыли  $D_p^{fact}$  в цехе будет меньше  $D_p^{max}$ , т. е. режим по концентрации пыли будет более комфортным. Для функционалов  $E$  и  $E^2(k)$  можно повторить сказанное выше с заменой  $D_f^{max}$  на  $D_p^{fact}$ .

## 9. План экспериментов.

Полученные системы уравнений (12) и (13) содержат девять неизвестных коэффициентов и тринадцать переменных. Для дальнейшей параметрической идентификации следует набрать достаточную статистику наблюдений указанных переменных. Заметим, что коэффициент  $\gamma_{ec}$  зависит от режима терморегуляции (охлаждение или нагрев), т. е. фактически представляет собой два коэффициента. Значения большинства переменных регистрируются штатными приборами учета и контроля, регистрация остальных также не является сложной задачей.

## 10. Заключение.

Сформулируем кратко полученные результаты. Получены структурно идентифицированные системы уравнений, описывающие подсистемы фильтрации и терморегуляции системы вентиляции цеха цементного производства. Эти системы содержат девять коэффициентов, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации. Рассмотрена задача агрегирования систем фильтрации и терморегуляции.

Дальнейшее развитие базовой модели может включать следующие этапы: добавление узлов, соответствующих кондиционированию помещения пульта управления, добавление переменных, описывающих влажность, разделение узла Cond на узел фильтрации и кондиционирования (терморегуляция + режим по влажности), разделение узла Plant на узлы, соответствующие зонам цеха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М. Окрестностные системы и алгоритм Качмажа // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2113–2120.
2. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М., Косарева А.С. Кластеризация окрестностной структуры // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 2. С. 457–462.
3. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Параметрическая идентификация окрестностных систем вблизи номинальных режимов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 3. С. 558–564.

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

Поступила в редакцию 14 августа 2017 г.

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

Мишачев Николай Михайлович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, e-mail: nmish@lipetsk.ru

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

UDC 519.71

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1346-1354

## AGGREGATION OF NEIGHBORHOOD SYSTEMS IN THE MODEL OF VENTILATION OF CEMENT PRODUCTION WORKSHOP

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

Lipetsk State Technical University  
30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russian Federation, 398600  
E-mail: nmish@lipetsk.ru, amsh@lipetsk.ru

The article considers an example of aggregation (merging) of neighborhood systems in the problem of mathematical modeling of the ventilation system of the cement production workshop. The aim of simulation is to optimize the operation of the ventilation system according to the criteria of energy consumption and environmental friendliness.

*Keywords:* neighborhood structures; neighborhood systems; identification; decomposition; aggregation

## REFERENCES

1. Shmyrin A.M., Mishachev N.M. Neighborhood systems and Kaczmarz algorithm // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. Tambov, 2016. V. 21. Iss. 6. P. 457–462.
2. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Kosareva A.S. Clustering of neighborhood structure // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. Tambov, 2016. V. 21. Iss. 2. P. 2113–2120.

3. *Mishachev N.M., Shmyrin A.M.* Parametric identification of neighborhood systems near nominal modes// *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences.* Tambov, 2017. V. 22. Iss. 3. P. 558–564.

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The work is partially supported by the Russian Fund for Basic Research (project № 16-07-00854).

Received 14 August 2017

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

Mishachev Nikolay Mikhailovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Higher Mathematics Department, e-mail: nmish@lipetsk.ru

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

**Для цитирования:** Шмырин А.М., Мишачев Н.М., Семина В.В. Агрегирование окрестностных систем в модели вентиляции цеха цементного производства // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 6. С. 1346–1354. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1346-1354.

**For citation:** Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Semina V.V. Agregirovaniye okrestnostnyh sistem v modeli ventilyacii cekha cementnogo proizvodstva [Aggregation of neighborhood systems in the model of ventilation of cement production workshop]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 1346–1354. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1346-1354 (In Russian, Abstr. in Engl.).