

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ ДЛЯ САУ ПРОИЗВОДСТВОМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Н. А. АЛЁШКИН

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
190000, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: ales\_nikita@mail.ru*

Рассматривается уточненная модель динамики климатического параметра — концентрации пыли — в воздухе чистого помещения при производстве микроэлектроники. Представленное математическое описание параметра позволяет построить адекватную имитационную модель климатической динамической системы. На основе разработанной модели в среде MatLab получены результаты, подтверждающие эффективность использования нечеткого регулирования при управлении климатической динамической системой в условиях непрогнозируемых возмущений, когда традиционные ПИД-регуляторы теряют устойчивость.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, параметры микроклимата, микроэлектроника, управление качеством, чистая комната

Постоянное повышение требований к качеству промышленного производства изделий микроэлектроники приводит к необходимости совершенствования систем управления технологическими процессами (ТП). Вопросы подтверждения соответствия нормативным требованиям чистых помещений при выполнении операций с повышенной чувствительностью к загрязнениям нашли отражение в ГОСТ Р ИСО 14644-2-2001. При этом актуальна адаптация управления ТП, в том числе к изменению микроклимата в чистом производственном помещении [1].

Исследования указывают на необходимость уточнения математической модели климатических параметров в автоматизированной системе управления производственными процессами [2, 3]. Модель должна учитывать многосвязность параметров микроклимата заданного технологического режима, что в большинстве известных подходов не принимается во внимание. Для этой цели воспользуемся формализованным методом описания, в основе которого лежит физический подход к моделированию динамических систем на основе построения балансных уравнений соответствующих параметров состояния [4, 5].

Наиболее значимыми параметрами микроклимата, влияющими на ТП в чистых производственных помещениях, являются температура воздуха, его влажность и предельная концентрация пыли [6]. Важно определить зависимость этих параметров от управляющих воздействий и возмущающих факторов для возможности корректной работы климатической динамической системы (КДС). На сегодняшний день математическое описание зависимости концентрации пыли в воздухе технологического помещения недостаточно корректно. Основные факторы, определяющие отмеченную зависимость, — кратность воздухообмена и взвешивание пыли в процессе производства — предлагается дополнить учетом диффузной эмиссии частиц твердыми средами производственного помещения. Эту связь можно задать дифференциальным уравнением:

$$\rho V \frac{dDu(t)}{dt} = G_{\text{атм}}(t)Du_{\text{атм}}(t) - G_{\text{ух}}(t)Du_{\text{ух}}(t) + G_{\text{тс}}(t), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $V$  — объем помещения ( $\text{м}^3$ ),  $Du(t)$ ,  $Du_{\text{атм}}$ ,  $Du_{\text{ух}}(t)$  — абсо-

лютное содержание пыли в воздухе помещения, в атмосфере и в уходящем воздухе соответственно (частиц/кг·м<sup>3</sup>);  $G_{\text{атм}}(t)$ ,  $G_{\text{yx}}(t)$  — скорость входящего и уходящего потоков воздуха соответственно (кг/с);  $G_{\text{тс}}(n, t)$  — выделение пыли твердыми средами внутри помещения (частиц/с·м<sup>3</sup>).

В приточной системе вентиляции можно принять за  $G(t)$  значение расхода свежего воздуха  $G_{\text{атм}}(t)$ , равное расходу уходящего воздуха  $G_{\text{yx}}(t)$ , а концентрацию пыли в уходящем воздухе  $Du_{\text{yx}}(t)$  — за концентрацию  $Du(t)$  в воздухе помещения. Запишем уравнение с учетом принятых допущений:

$$\rho V \frac{dDu(t)}{dt} = G(t)Du_{\text{атм}}(t) - G(t)Du(t) + G_{\text{тс}}(t).$$

Перенесем  $Du(t)$  в левую часть уравнения:

$$\rho V \frac{dDu(t)}{dt} + G(t)Du(t) = G(t)Du_{\text{атм}}(t) + G_{\text{тс}}(t).$$

Разделим обе части уравнения на  $G(t)$ :

$$\frac{\rho V}{G(t)} \frac{dDu(t)}{dt} + Du(t) = Du_{\text{атм}}(t) + \frac{G_{\text{тс}}(t)}{G(t)}.$$

Запишем уравнение в операторном виде, обозначив  $T_{Du} = \frac{\rho V}{G(t)}$ :

$$(T_{Du}p + 1)Du(p) = Du_{\text{атм}}(p) + \frac{G_{\text{тс}}(p)}{G(p)} + T_{Du}Du(0), \quad (2)$$

откуда

$$Du(p) = \frac{Du_{\text{атм}}(p) + \frac{G_{\text{тс}}(p)}{G(p)} + T_{Du}Du(0)}{(T_{Du}p + 1)}.$$

Полученное выражение описывает взаимосвязь концентрации пыли  $Du(t)$  в воздухе помещения с содержанием ее в приточном воздухе  $Du_{\text{атм}}(t)$  и с выделением  $G_{\text{тс}}(t)$  твердыми средами чистой комнаты.

Рассмотрим эти факторы по отдельности. Влияние концентрации пыли  $Du_{\text{атм}}(t)$  в приточном воздухе выразим передаточной функцией:

$$W_{Du_1}(p) = \frac{Du(p)}{Du_{\text{атм}}(p)} = \frac{1}{(T_{Du}p + 1)},$$

где  $Du(p)$ ,  $Du_{\text{атм}}(p)$  — изображение Лапласа для концентрации пыли внутри технологического помещения и в приточном воздухе соответственно.

Определим взаимосвязь между концентрацией пыли  $Du(t)$  и задающим воздействием  $G(t)$ , приняв величину  $\frac{1}{G(p)}$  за  $G'(p)$ .

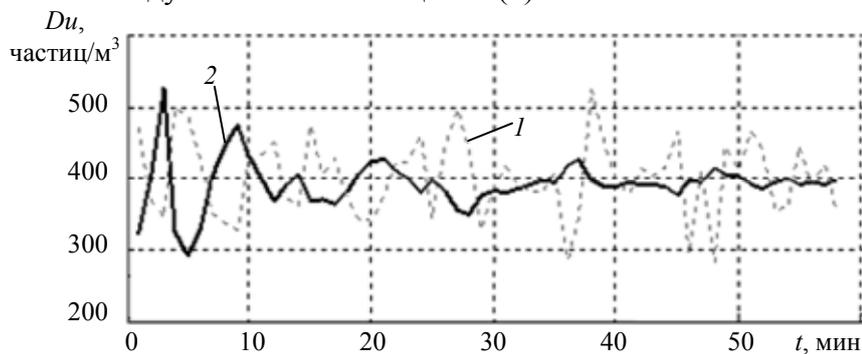
Таким образом, запишем передаточную функцию по расходу воздуха:

$$W_{Du_2}(p) = \frac{Du(p)}{G'(p)} = \frac{k_5}{(T_{Du}p + 1)}, \text{ где } k_5 = G_{\text{тс}}(p) = \text{const}.$$

Найдем передаточную функцию для изменения концентрации  $Du(t)$  по изменению значения функции  $G_{\text{тс}}(t)$ :

$$W_{Du_3}(p) = \frac{Du(p)}{G_{тс}(p)} = \frac{k_6}{(T_{Du}p + 1)}, \text{ где } k_6 = \frac{1}{G(p)} = \text{const.}$$

Как видно, все передаточные функции  $W_{Du_i}(p)$ ,  $i=1—3$ , представлены типовым инерционным звеном, что позволяет в дальнейшем при использовании подобных данных для температуры и влажности синтезировать адекватную модель САУ климатической динамической системы ТП в среде MatLab компьютерного моделирования [7]. Особенности поведения климатических параметров в производственном процессе изготовления микроэлектроники определяются наличием непрогнозируемых возмущений. Поэтому использование в САУ традиционной технологии ПИД-регулирования не всегда оправданно. Лучшие результаты демонстрирует САУ с нечеткой логикой управления [5]. На рисунке приведены результаты моделирования в среде MatLab переходного процесса для контура традиционной САУ с ПИД-регулированием (кривая 1) и САУ с нечеткой логикой управления, задающего уровень концентрации пыли в воздухе чистого помещения (2).



В реальном производственном процессе поддержание заданного микроклимата требует применения сложных алгоритмов раздельного регулирования температуры, влажности и содержания пыли в воздухе технологического помещения. Использование ПИД-регуляторов в КДС дает удовлетворительные результаты, если объект управления отвечает условиям стационарности. В общем случае в КДС следует использовать адаптивный регулятор с интеллектуальным контуром управления. Наиболее полно этим рекомендациям соответствуют методы управления, использующие комбинацию систем рекуррентного оценивания и нечеткого регулирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антохина Ю. А., Варжапетян А. Г., Иняц Н., Оводенко А. А., Семенова Е. Г., Смирнова М. С. Интеграция моделей, методов и инструментов управления проектами: монография. СПб: Политехника, 2015. 360 с.
2. Пешко М. С. Раскрытая математическая модель микроклимата грибной теплицы // Молодой ученый. 2011. № 9. С. 42—48.
3. Алёшкин Н. А. К вопросу о совершенствовании интеллектуальных технологий аппаратно-программного обеспечения при управлении качеством производства специальной микроэлектроники // Вопросы радиоэлектроники. Сер. „Радиолокационная техника“. 2015. Вып. 4. С. 150—160.
4. Семенов В. Г., Крушель Е. Г. Математическая модель микроклимата теплицы // Изв. ВолгГТУ. 2009. № 6. С. 140.
5. Проектирование чистых помещений / Под ред. В. Уайта. М.: Клинрум, 2004.
6. Аль Джубури Иссам М. А. Автоматическое регулирование микроклимата в зданиях и сооружениях на базе нечеткой логики // Строительный вестник Российской инженерной академии. Тр. секции „Строительство“. 2008. Вып.9. С. 193—198.
7. Усков А. А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ „Российский университет кооперации“, 2013. 153 с.

**Никита Андреевич Алёшкин**

**Сведения об авторе**

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: ales\_nikita@mail.ru

Рекомендована кафедрой инноватики и интегрированных систем качества

Поступила в редакцию 05.09.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Алёшкин Н. А. Динамическая модель концентрации пыли для САУ производством микроэлектроники // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 10. С. 884—887.

**DYNAMIC MODEL OF DUST CONCENTRATION FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MICROELECTRONICS PRODUCTION**

**N. A. Aleshkin**

*St. Petersburg University of Aerospace Instrumentation,  
190000, St. Petersburg, Russia  
E-mail: ales\_nikita@mail.ru*

A refined model of behavior of dust concentration as a climatic parameter of the air of a clean room in microelectronics production enterprise is developed. The adequate simulation model of the climate dynamical system is based on presented mathematical description of the parameter. Results obtained in MATLAB using the developed model confirm the effectiveness of fuzzy control of climate system under unpredictable disturbances when traditional PID controllers are buckling.

**Keywords:** automatic control system, parameters of microclimate, microelectronics, quality management, clean room

**Data on author**

**Nikita A. Aleshkin**

— Post-Graduate Student; St. Petersburg University of Aerospace Instrumentation; Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: ales\_nikita@mail.ru

**For citation:** Aleshkin N. A. Dynamic model of dust concentration for automatic control system of microelectronics production // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 10. P. 884—887 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-884-887