

*Глебов Р.С., аспирант  
Туманов М.П., кандидат технических наук, доцент  
Антюшин С.С., аспирант  
(Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет))*

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

*В связи с появлением новых требований к системам вентиляции, экспериментальные методы настройки замкнутых контуров управления не могут в полной мере решить задачи автоматизации технологического процесса. Экспериментальные методы настройки имеют заложенные критерии оптимизации (критерии качества управления), что ограничивает область их применения. Параметрический синтез системы управления, учитывающего все требования технического задания, требует математической модели объекта. В статье приводится анализ структур математических моделей вентиляционной установки, рассматривается метод идентификации вентиляционной установки, оценивается возможность применения полученных моделей для применения на практике.*

**Ключевые слова:** *идентификация, математическая модель, вентиляционная установка, экспериментальное исследование математической модели, критерии качества математической модели.*

**PRACTICAL ASPECTS OF IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF VENTILATING INSTALLATION**

*In connection with occurrence of new requirements to systems ventilation, experimental methods of adjustment of the closed contours of management can't solve a problem of automation of technological process to the full. Experimental methods of adjustment have the put criteria of optimization (criterion of quality of management) that limits area of their application. Parametrical synthesis of the control system, the technical project considering all requirement, demands mathematical model of object. In article to be resulted the analysis of structures of mathematical models of ventilating installation, the method of identification of ventilating installation is considered, possibility of application of the received models for application in practice is estimated.*

**Key words:** *identification, mathematical model, ventilating installation, experimental research of mathematical model, criteria of quality of mathematical model.*

**Введение**

Управление системами вентиляции является одной из основных задач автоматизации инженерных систем здания. Требования к системам управления вентиляционными установками формулируются в виде критериев качества во временной области.

**Основные критерии качества:**

1. Время переходного процесса ( $t_{пп}$ ) – время выхода вентиляционной установки на рабочий режим.
2. Установившаяся ошибка ( $e_{уст}$ ) - максимально допустимое отклонение температуры подаваемого воздуха от заданного.

**Косвенные критерии качества:**

3. Перерегулирование ( $\Delta h$ ) – перерасход мощности при управлении вентиляционной установкой.

4. Степень колебательности ( $\psi$ ) – избыточный износ вентиляционного оборудования.
5. Степень затухания ( $\psi$ ) – характеризует качество и скорость установления требуемого температурного режима.

Главной задачей автоматизации системы вентиляции является параметрический синтез регулятора. Параметрический синтез заключается в определении коэффициентов регулятора для обеспечения критериев качества предъявляемых к системе вентиляции [3,4].

Для синтеза регулятора вентиляционной установки выбирают инженерные методы, удобные для применения на практике, которые не требуют исследования математической модели объекта: метод Nichols-Zigler (NZ), метод Chien-Hrones-Reswick (CHR) [3,4]. К современным системам автоматизации вентиляции предъявляются высокие требования показателей качества, сужаются допустимые граничные условия показателей, появляются многокритериальные задачи управления. Инженерные методы настройки регуляторов не позволяют изменить заложенные в них критерии качества управления. Например, при использовании метода NZ для настройки регулятора, критерием качества является декремент затухания равный четырем, а при использовании метода CHR, критерием качества является максимальная скорость нарастания при отсутствии перерегулирования. Использование данных методов в решении многокритериальных задач управления требует дополнительную ручную корректировку коэффициентов. Время и качество настройки контуров управления, в данном случае, зависит от опыта инженера наладчика.

Применение современных средств математического моделирования для синтеза системы управления вентиляционной установкой существенно повышает качество процессов управления, позволяет сократить время наладки системы, а также позволяет синтезировать алгоритмические средства обнаружения и предотвращения аварий. Для моделирования системы управления необходимо создать адекватную математическую модель вентиляционной установки (объекта управления).

Практическое использование математических моделей без оценки адекватности вызывает ряд проблем:

1. Настройки регулятора, полученные при математическом моделировании, не гарантируют соответствие показателей качества на практике.
2. Применение на практике регуляторов с заложенной математической моделью (форсирующее управление, экстраполятор Смита и т.д.) может вызывать ухудшение показателей качества. При несоответствии постоянной времени или заниженном коэффициенте усиления возрастает время выхода вентиляционной установки на рабочий режим, при завышенном коэффициенте усиления происходит избыточный износ вентиляционного оборудования, и т.д.
3. Применение на практике адаптивных регуляторов с оценкой по эталонной модели также вызывает ухудшение показателей качества аналогично приведенному выше примеру.
4. Настройки регулятора, полученные методами оптимального управления, не гарантируют соответствие показателей качества на практике.

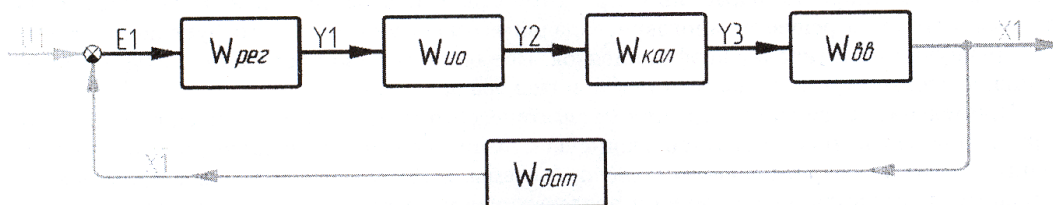
Целью данного исследования является определение структуры математической модели вентиляционной установки (по контуру управления температурным режимом) и оценка ее адекватности реальным физическим процессам нагрева воздуха в системах вентиляции.

Опыт проектирования систем управления показывает, что нельзя получить математическую модель, адекватную реальной системе, только на основе теоретических исследований физических процессов системы. Поэтому в процессе синтеза модели вентиляционной установки одновременно с теоретическими исследованиями проводились эксперименты по определению и уточнению математической модели системы - ее идентификация [2].

**Технологический процесс системы вентиляции, организация эксперимента и структурная идентификация**

Объектом управления системы вентиляции выступает центральный кондиционер, в котором происходит обработка воздушного потока и его подача в вентилируемые помещения. Задачей локальной системы управления вентиляции является автоматическое поддержание температуры приточного воздуха в канале. Текущее значение температуры воздуха оценивается по датчику, установленному в приточном канале или в обслуживаемом помещении. Регулирование температуры приточного воздуха осуществляется электрическим или водяным калорифером. При использовании водяного калорифера исполнительным органом является трехходовой клапан, при использовании электрического калорифера - широтно-импульсный или тиристорный регулятор мощности[3].

Стандартный алгоритм управления температурой приточного воздуха представляет замкнутую систему автоматического регулирования (САР), с ПИД-регулятором в качестве устройства управления. Структура автоматизированной системы управления температурой приточного воздуха вентиляцией приведена (рис. 1)[1].



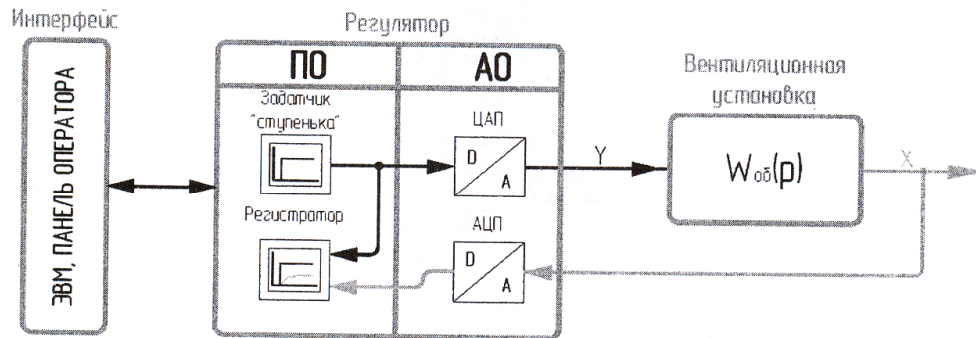
**Рис. 1.** Структурная схема автоматизированной системы управления вентиляционной установкой (канал управления температурой приточного воздуха).  $W_{рег}$  – ПФ регулятора,  $W_{ис}$  – ПФ исполнительного органа,  $W_{кал}$  – ПФ калорифера,  $W_{об}$  – передаточная функция воздуховода.  $U1$  – уставка температуры,  $X1$  – температура в канале,  $X1$  – показания датчика,  $E1$  – ошибка регулирования,  $Y1$  – управляющее воздействие регулятора,  $Y2$  – отработка исполнительным устройством сигнала регулятора,  $Y3$  – тепло переданное калорифером в канал.

Синтез математической модели системы вентиляции предполагает, что известна структура каждой передаточной функции, входящей в ее состав. Применение математической модели, содержащей передаточные функции отдельных элементов системы, является сложной задачей и не гарантирует на практике суперпозицию отдельных элементов с исходной системой. Для идентификации математической модели структуру системы управления вентиляцией удобно разделить на две части: априорно известную (регулятор) и неизвестную (объект). Передаточная функция объекта ( $W_{об}$ ) включает в себя: передаточную функцию исполнительного органа ( $W_{ис}$ ), передаточную функцию калорифера ( $W_{кал}$ ), передаточную функцию воздуховода ( $W_{вв}$ ), передаточную функцию датчика ( $W_{дат}$ ). Задача идентификации вентиляционной установки при управлении температурой воздушного потока сводится к определению функциональной зависимости между управляющим сигналом на исполнительный элемент калорифера  $Y1$  и температурой воздушного потока  $X1$ .

Для определения структуры математической модели вентиляционной установки необходимо провести эксперимент по идентификации. Получение искомым характеристик возможно путем пассивного и активного эксперимента[2]. Метод пассивного эксперимента основан на регистрации контролируемых параметров процесса в режиме нормальной работы объекта без внесения в него каких-либо преднамеренных возмущений. На этапе наладки система вентиляции не находится в режиме нормальной работы, поэтому метод пассивного эксперимента не подходит для наших целей. Метод активного эксперимента основан на использовании определенных искусственных возмущений, вводимых в объект по заранее спланированной программе.

Существуют три принципиальных метода активной идентификации объекта: метод переходных характеристик (реакция объекта на «ступеньку»), метод возмущения объекта сигналами периодической формы (реакция объекта на гармонические возмущения с различной частотой) и метод реакции объекта на дельта-импульс. В связи с большой инерционностью систем вентиляции (ТОБ составляет от десятков секунд до нескольких минут) идентификация сигналами периодической формы представляет собой длительный по времени процесс. Сложность организации тестового сигнала в методе реакции объекта на дельта-импульс затрудняет применение его на практике, так как данный тип управляющего воздействия является теоретическим, поскольку его амплитуда стремится к бесконечности, а время воздействия к нулю. Система вентиляции, как объект управления, имеет ограничение по мощности сигналов управления и скорости реакции исполнительного элемента калорифера. Система вентиляции является тепловым объектом и имеет большую инерционность (является фильтром нижних частот), поэтому реакция на дельта-импульс может быть незначительной.

Идентификация системы вентиляции методом переходных характеристик имеет ряд преимуществ: тестовый сигнал «ступенька» является типовым сигналом управления вентиляционной установкой; существует большое количество методов параметрической идентификации объекта, основанных на данном типе тестовых сигналов [2,4]; организация эксперимента методом переходных характеристик не требует изменения физической структуры системы вентиляции, достаточно изменить программное обеспечение контроллера. (см. рисунок 2).



**Рис. 2.** Структурная схема эксперимента идентификации объекта, X – сигнал датчика температуры, Y – управляющее воздействие на калорифер.

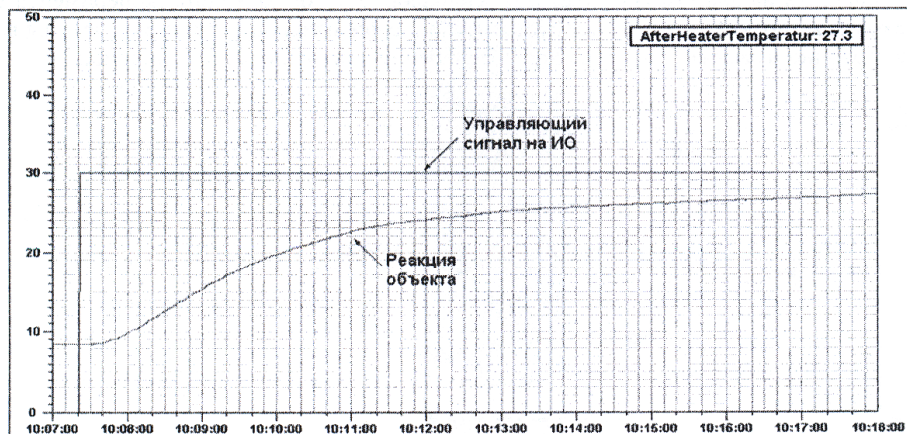
Специфика идентификации системы вентиляции, как объекта автоматического управления, заключается в том, что идентификация производится на реальном объекте, это позволяет учитывать особенности монтажа и реальных условий эксплуатации. Подобные испытания накладывают ряд ограничений на эксперименты идентификации системы вентиляции (объект):

1. Эксперименты по идентификации проводятся после окончания монтажа вентиляционной установки и системы автоматики.
2. Необходимо наличие интерфейса для получения и протоколирования переходной характеристики вентиляционной установки.
3. Идентификация системы должна производиться в рабочем диапазоне температур системы вентиляции (соответствующим образом подбираются параметры тестового сигнала).
4. Система безопасности вентиляционной установки должна функционировать. Система безопасности позволит предотвратить аварии в нормальном режиме работы и при идентификации системы вентиляции (пожары, затопления, механические повреждения воздуховодов, двигателя и другого вентиляционного оборудования).

При проведении эксперимента, основной задачей является определение параметров тестового сигнала – управляющее воздействие на исполнительный орган. Для тестового воздействия «ступенька» параметрами являются: начальное значение сигнала, конечное значение сигнала и момент включения.

Начальное значение тестового сигнала (мощность, подаваемая на калорифер) необходимо подобрать таким образом, чтобы температура в системе вентиляции стала на уровне минимального допустимого значения (5-15°C). Управляющее воздействие на объект можно оставить нулевым (нет нагрева калорифера), если эксперимент проводится при положительной наружной температуре.

Конечное значение тестового сигнала выбирается таким образом, чтобы значение системы (значение температуры в канале) в установившемся режиме было максимальным из допустимого диапазона (30-35 °С). При превышении температуры верхнего порога эксплуатации, систему необходимо вернуть в начальное состояние, дождаться окончания переходного процесса и повторить эксперимент, уменьшив значение управляющего воздействия на исполнительный элемент. Увеличение разницы между начальным и конечным значением тестового сигнала позволяет получить более точный результат идентификации.



**Рис. 3.** Переходная характеристика вентиляционной характеристики.

Типовой вид переходной характеристики объекта вентиляционной установки приведен на рисунке 3. Из графика переходной характеристики (рис.3) видно, что структура математической модели вентиляционной установки представляет собой фильтр нижних частот. Значение показателя степени фильтра зависит от требований, которые предъявляются к точности математического описания системы. Точность идентификации пропорциональна затратам процесса идентификации.

Современные структуры математических моделей представлены на рисунке 4 - модели а) и б) [3]. Современные системы управления вентиляцией (например, вентиляционные установки с технологией Direct Control Ventilation (DCV)) требуют более точного описания динамики процесса, поэтому данные структуры математических моделей имеют ограничения по применению.

$$\text{а) } W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{p+1} \qquad \text{б) } W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{T_{об}p+1} \cdot e^{-\tau_{об}p} \qquad \text{в) } W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{(T_{об}p+1)^m} \cdot e^{-\tau_{об}p}$$

**Рисунок 4.** Результаты параметрической идентификации ВУ (для нормированных и усредненных переходных характеристик)

Выбор структуры математической модели должен учитывать достаточную точность описания реальных процессов и целесообразность трудозатрат. Сравнительная характеристика структур математических моделей вентиляционных установок приведена в таблице 1.

### Параметрический синтез вентиляционной установки

После выбора структуры математической модели, необходимо выполнить параметрический синтез объекта управления, получить числовые значения параметров выбранной структуры. Параметрическая идентификация включает следующие этапы:

1. Фильтрация переходной характеристики от шумов.
2. Нормирование переходных характеристик.
3. Усреднение нормированных переходных характеристик.
4. Аппроксимация переходных характеристик.

Фильтрация переходных характеристик от шумов в системах вентиляции применяется в зависимости от того, к какой части системы приложена помеха. Если помеха прикладывается к входу объекта, имеет сравнительно небольшую амплитуду и частоту большую, чем частота среза системы вентиляции, фильтрацию переходных характеристик можно не использовать, так как вентиляционная установка является фильтром низких частот. Если помеха прикладывается к выходу системы (источники помехи физически располагается рядом с датчиком температуры), то фильтрация необходима. Примером подобной ситуации может служить электрический калорифер управляемый широтно-импульсным регулятором мощности. Для качественного управления системой вентиляцией датчик температуры необходимо располагать вблизи исполнительного элемента [3]. При использовании ШИ-регулятора мощности, датчик температуры реагирует на включение и выключение ТЭНа. На переходной характеристике возникают периодические незатухающие колебания малой амплитуды с частотой пропорциональной частоте работы ШИ-регулятора мощности. Данный процесс наблюдается в вентиляционных установках с избыточно мощным нагревательным элементом (рисунок 5).

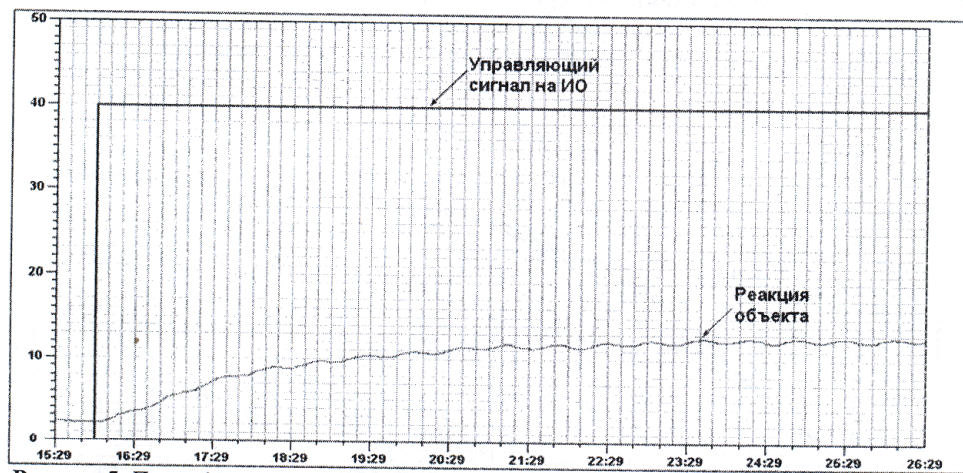


Рисунок 5. Переходная характеристика вентиляционной установки, требующая фильтрации шумов

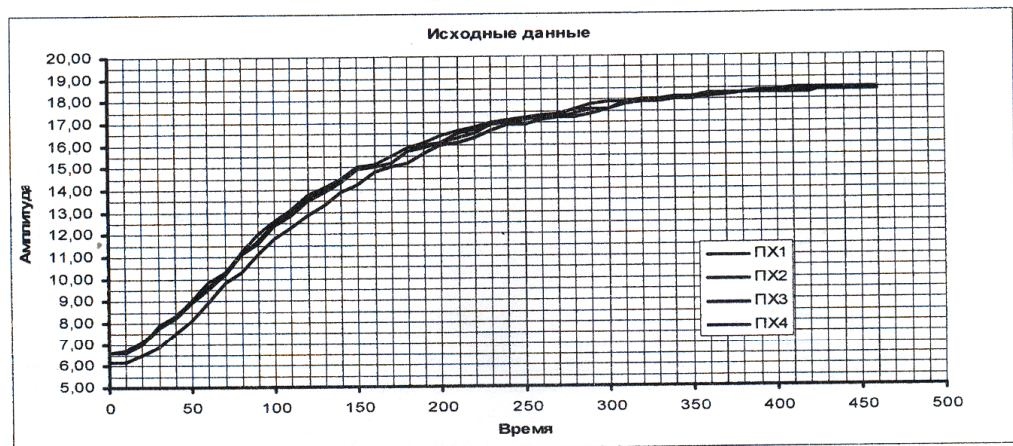
Нормирование и усреднение переходных характеристик применяется, если для идентификации объекта была проведена серия экспериментов. Серию экспериментов по определению переходной характеристики вентиляционной установки целесообразно проводить для различных наружных температурах и для различных управляющих воздействий. Данный подход позволяет:

- Повысить точность идентификации (учитывается усредненное влияние наружной температуры на систему вентиляции).
- Учитывается усредненное влияние помех и внешних возмущений на систему вентиляции (устранить случайные ошибки идентификации).
- Учитывается влияние различных по амплитуде управляющих воздействий. В данном случае необходимо нормирование экспериментальных данных, для их дальнейшего усреднения.

Аппроксимация переходной характеристики объекта является наиболее сложной задачей идентификации, поскольку требует математического аппарата и вычислительных средств. С практической точки зрения, наиболее удобными являются методы получения математической модели в виде передаточной функции, минуя аппроксимацию во временной области. Математический аппарат передаточных функций поддерживается современными программными средствами моделирования систем управления: MatLab, VisSim, Maple, MatCad, «ТАУ 2.0», «ИСИДОРА». Данные системы моделирования имеют в своем арсенале аппарат для идентификации объектов управления по его переходной характеристике, что освобождает инженера наладчика от рутинных процессов вычисления. Системы моделирования Matlab и VisSim могут интегрировать аппаратное обеспечение (контроллер системы управления) с системой идентификации, что позволяет автоматизировать процесс идентификации и наладки системы вентиляции. Основными методами параметрической идентификации в данных системах являются: метод Стрейка, метод Наслена, метод Бройда, метод Ротаца, метод Ормана, метод номограмм, метод площадей, метод Симою, метод последовательного интегрирования, метод последовательного логарифмирования, метод Трошина, метод номограмм Трошина, метод Кардашова-Корнюхина.

#### **Анализ структур математических моделей вентиляционных установок**

На основе структурной схемы эксперимента (рис. 2) была проведена серия экспериментов по идентификации математической модели. Результатом эксперимента идентификации являются переходные характеристики вентиляционной установки (рисунок 6).

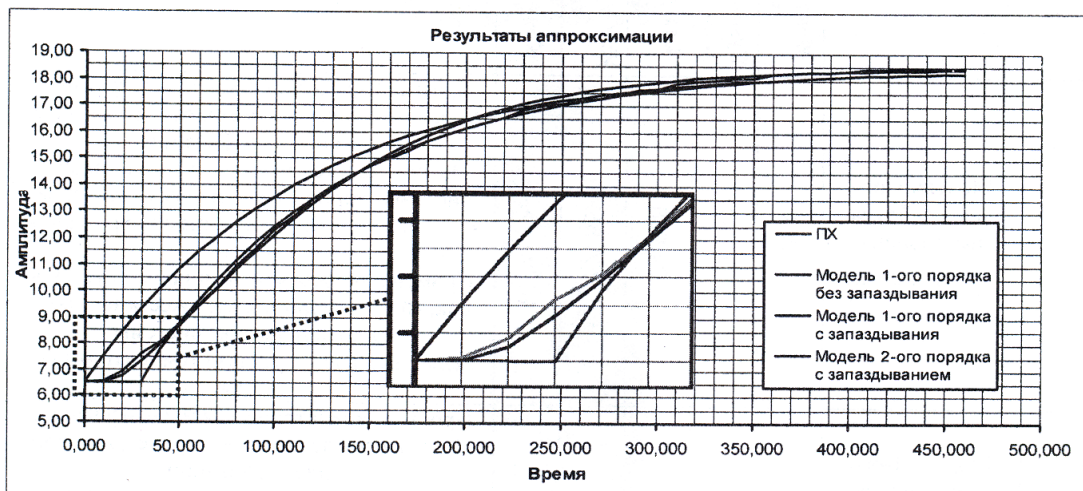


**Рисунок 6.** Переходная характеристика вентиляционной установки, управляющее воздействие 30 % мощности калорифера, уличная температура 10-15 °С

По результатам эксперимента было проведено усреднение и нормирование переходных характеристик. Аппроксимация проводилась с использованием программного обеспечения «ИСИДОР». В качестве метода параметрической идентификации был выбран метод Трошина. Результаты параметрической идентификации (рис. 7а и 7б.):

$$а) W_{об}(p) = \frac{11,98}{112,55p + 1} \quad б) W_{об}(p) = \frac{11,98}{104,49p + 1} \cdot e^{-29,07p} \quad в) W_{об}(p) = \frac{11,98}{(63,45p + 1)^m} \cdot e^{-0,057p}$$

**Рисунок 7а.** Результаты параметрической идентификации ВУ



**Рисунок 7б.** Результаты параметрической идентификации ВУ (графическое представление)

Для оценки качества полученных математических моделей использовались следующие критерии адекватности:

- Максимальное отклонение аппроксимированной функцией от кривой разгона.
- Сумма абсолютных значений разности аппроксимированной функцией и кривой разгона.
- Сумма квадратов разности между кривой разгона и аппроксимированной функцией.
- Интеграл функции разности между кривой разгона и аппроксимированной функцией.
- Критерий Фишера - комплексный параметр, включающий оценки воспроизводимости эксперимента и адекватность математической модели.

### Заключение

Моделирование вентиляционной установки дает возможность качественно настроить контур управления температурным режимом. В отличие от инженерных методов настройки система не подвергается многочисленным экспериментам и выходом на аварийные режимы. Математическое описание вентиляционной установки позволяет аналитически оценить качество работы системы в различных режимах работы, включая аварийные режимы (например границу устойчивости), а также выполнить оптимизацию процессов управления.



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Самарин О.Д., Мжачих К.М. О влиянии характеристик помещения на процессы регулирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха. // «СОК», 2007, № 1, стр.76 – 78.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей: Пер. с англ./ Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с. ISBN 5-02-014511-4
3. Бондарь Е.С., Гордиенко А.С., Михайлов В.А., Нимич Г.В. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Под общ. ред. Е.С. Бондаря –К.: ТОВ «Видавничий будино «Аванпост-Прим» 2005. – 560 с., стр.101-103., стр. 310-311
4. Клюев А.С., Лебедев А.Т., Клюев С.А. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат 1989.стр.307-308, стр.337–341.

