

# Проекты автоматизации вентиляторных градирен

Николай Киянов, Олег Крюков, Сергей Лопатников, Андрей Смирнов, Дмитрий Прибытков

Рассмотрены особенности современных водооборотных систем охлаждения технологического оборудования с помощью вентиляторных градирен. Проанализированы факторы, влияющие на стабильность, надёжность и эффективность работы градирни. Предложены рациональные схмотехнические и алгоритмические средства автоматизации. Представлены результаты моделирования и внедрения автоматизированных вентиляторных градирен.

## ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ВОДОБОРОТНЫХ СИСТЕМ С ГРАДИРНЯМИ

Компанией ООО «Интермодуль» в 2004-2006 годах по заказу разных организаций и предприятий были реализованы проекты по разработке электрооборудования и автоматизации нескольких новых трёхсекционных вентиляторных градирен [1].

В общем случае водооборотные системы, применяемые в горнодобывающей, нефтеперерабатывающей, стекольной, химической промышленности, машиностроении, металлургии и других отраслях, включают в себя (рис. 1):

- промышленных потребителей, использующих оборотную воду для охлаждения машин, аппаратов и рабочих сред;
- насосные станции с системой водоподготовки для обеспечения циркуляции воды в системе;
- охладительные установки (градирни).

Для повышения эффективности технологического процесса охлаждения воды и обеспечения энергосбережения в периоды пониженной нагрузки на охладительные установки целесообразно внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) водооборотных циклов. Автоматизация технологического процесса охлаждения воды может быть:

- частичной (с функциями частотного регулирования, мониторинга и дистанционного управления);

- полной (автоматическое регулирование и управление без непосредственного участия человека).

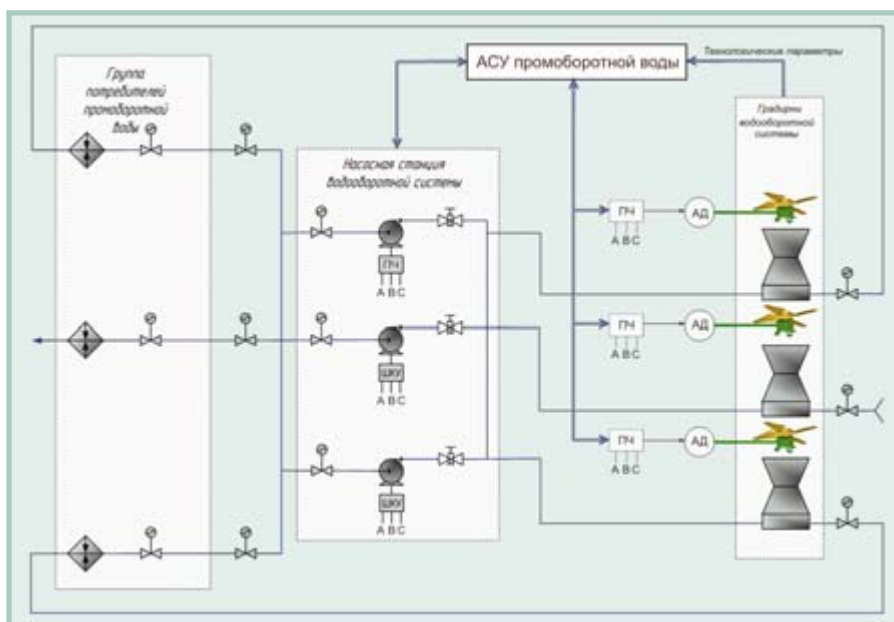
Частичная автоматизация технологического процесса, предполагающая использование программируемого логического контроллера, обеспечивает:

- реализацию функции сбора данных;
- выработку управляющих воздействий;
- поддержание оптимального режима с целью минимизации энергетических затрат на эксплуатацию основного энергопотребляющего оборудования (насосы, вентиляторы);

- диагностику и прогнозирование неисправностей теплотехнической и электромеханической частей системы.

Для визуализации технологического процесса используются SCADA-системы с функциями диагностики состояния оборудования и технологического процесса, что помогает своевременно осуществлять профилактические ремонты и замену оборудования, снижать риск возникновения нештатных и аварийных режимов работы и повышать надёжность системы.

Полная автоматизация технологического процесса охлаждения воды предполагает:



Условные обозначения: АД — асинхронный двигатель; ПЧ — преобразователь частоты; ШКУ — шкаф контакторного управления.

Рис. 1. Функциональная схема водооборотной системы

- комплекс мероприятий по переоснащению оборудования технологического процесса устройствами защиты и/или диагностики;
- замену существующих исполнительных механизмов и КИПиА на новые, которые позволяют производить мониторинг, диагностику и управление в реальном времени без участия человека.

Основным звеном в такой системе тоже является программируемый логический контроллер, связанный с верхним уровнем системы и обеспечивающий:

- автоматическое управление всеми технологическими процессами;
- передачу измеренных значений физических величин на АРМ диспетчеров АСУ ТП;
- защиту и блокировку оборудования и исполнительных механизмов;
- предупредительную и аварийную сигнализацию.

Сбор данных и архивирование параметров процесса происходит на сервере сбора данных, расположенном в операторной объекта. Сервер сбора данных имеет избыточные вычислительные мощности и ресурсы информационных накопителей и позволяет хранить параметры технологического процесса в течение нескольких лет.

Полная автоматизация технологического процесса связана с реализацией функций регулирования, мониторинга, диагностики и управления. Она позволяет не только добиться высоких показателей эффективности производства охлажденной воды и снизить затраты электроэнергии, но и увеличить срок службы оборудования и повысить безопасность технологического процесса.

## АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРЕН

В качестве примера рассмотрим проект автоматизированной вентиляторной градирни одного из горнодобывающих предприятий России производительностью 1000 куб. м/ч и с тремя секциями площадью 144 кв. м. Она относится к классу градирен с противотоком и предназначена для охлаждения технологической (промежоточной) воды, которая в результате нагрева имеет температуру в диапазоне  $t_1 = 30...40^\circ\text{C}$ , до стабильной температуры  $t_0 = 28^\circ\text{C}$  в условиях воздействия различных возмущений. К этим возмущениям относятся метеорологические факторы: температура и влажность воздуха, ве-

тер, атмосферное давление и прочие, — и факторы технологические: изменения подачи (производительности) циркуляционных насосов и температуры горячей воды (или температурного перепада входной/выходной воды).

Наибольшее влияние на процесс охлаждения оказывают значения четырех параметров: перепада температур горячей/охлажденной воды  $\Delta t_{\text{ГО}}$  ( $\Delta t_{\text{ГО}} = 2...12^\circ\text{C}$ ), температуры окружающего воздуха  $t_{\text{В}}$  ( $t_{\text{В}} = 5...35^\circ\text{C}$ ), его влажности  $\beta$  ( $\beta = 50...100\%$ ) и подачи насоса  $Q$ . Так как скорость вращения вентилятора  $\omega$  задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры охлажденной воды необходимо:

- получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков с дискретностью 1 минута;
- вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения вентилятора градирни  $\omega_{\text{зад}} = f(\Delta t_{\text{ГО}}, t_{\text{В}}, \beta, Q)$ ;
- скорректировать её с учётом стабилизирующего действия обратной связи по выходной координате — температуре охлажденной воды  $t_0 = 28^\circ\text{C}$ .

Охлаждение технологической воды в градирне физически представляет собой два процесса [2]:

- 1) теплообмен падающих распыленных капель горячей воды со встречным потоком воздуха, имеющего температуру окружающей среды;
- 2) испарение, связанное с фазовым переходом воды в парообразное состояние при массовом её разбрызгивании и принудительной вентиляции.

Для получения стабильной температуры охлажденной воды система авто-

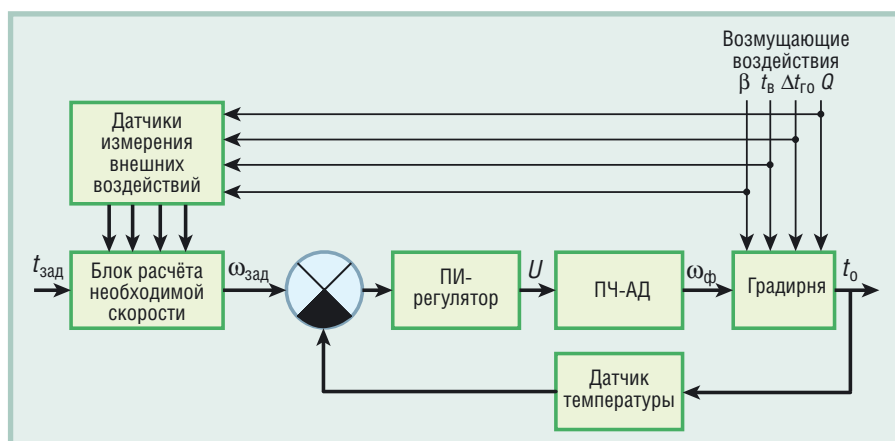
матизации вентиляторной градирни имеет:

- блок точного задания скорости вращения электроприводом вентилятора для стабильной работы в разомкнутой системе управления в условиях действия всех технологических и метеорологических факторов;
- контур стабилизации температуры охлажденной воды для коррекции заданной скорости по сигналам обратной связи, особенно при неадекватных показаниях метеодатчиков и сильном воздействии неучтенных факторов.

Функциональная схема автоматизированного управления технологическим процессом охлаждения воды в вентиляторной градирне показана на рис. 2.

Преобразователь частоты для асинхронных двигателей на базе Altivar38 позволяет реализовать энергоэкономичный закон скалярного регулирования скорости электропривода ПЧ-АД (преобразователь частоты — асинхронный двигатель) с вентиляторной нагрузкой  $U/f^2 = \text{const}$  ( $U$  и  $f$  — величины напряжения и частоты соответственно). При этом снижение скорости вентилятора градирни относительно номинального значения  $\omega_{\text{НОМ}} = 180,5$  об./мин сопровождается квадратичным снижением момента нагрузки ( $M_c = \kappa_1 \omega^2$ ) и кубическим уменьшением потребляемой мощности ( $P = \kappa_2 \omega^3$ ). Это повышает технико-экономическую эффективность и сокращает срок окупаемости ПЧ и компьютерной системы регулирования до 0,5...1,5 лет.

Вторым важным фактором, обеспечивающим технико-экономический



Условные обозначения:  $t_{\text{зад}}, t_0$  — температура охлажденной воды, заданная и фактическая соответственно;  $\omega_{\text{зад}}, \omega_{\text{ф}}$  — скорость вращения электропривода вентилятора, заданная и фактическая соответственно;  $\Delta t_{\text{ГО}}$  — перепад температур горячей/охлажденной воды;  $t_{\text{В}}$  — температура окружающего воздуха;  $\beta$  — влажность окружающего воздуха;  $Q$  — подача насоса;  $U$  — питающее напряжение; ПЧ-АД — система частотно-регулируемого электропривода «преобразователь частоты — асинхронный двигатель».

Рис. 2. Функциональная схема автоматизации вентиляторной градирни



Рис. 4. Общий вид шкафа системы автоматизации вентиляторной градирни

эффект применения частотного регулирования скорости вентилятора, является стабилизация главного выходного параметра градирни – температуры охлажденной воды – на уровне  $t_0 = 28^\circ\text{C}$ . Как правило, строгое соблюдение параметров основного технологического процесса позволяет повысить производительность и качество выпускаемой продукции. Поэтому программная реализация пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-Р) САР корректирующего контура обратной связи главного технологического параметра  $t_0 = \text{const}$  имеет большое практическое значение.

Немаловажное значение имеет повышение надёжности и долговечности работы двигателей, редукторов и другого механического оборудования. Это достигается за счёт непрерывной диагностики элементов электрооборудования средствами ПЧ и промышленного компьютера (ПК), прогнозирования неисправностей в фоновом режиме, формирования оптимальных динамических режимов.

Реализация тахограмм «мягкого» пуска, торможения и перехода на новые скорости при минимальной кратности токов АД благоприятно сказывается на старении изоляции обмоток двигателя, его тепловом состоянии, а ограничение больших динамических моментов приводит к отсутствию напряжений и ударов в механических передачах (длинных валах, редукторах и лопастях вентилятора). К тому же становится возможной работа вентилято-

ра в зоне помпажа и снижается вероятность рециркуляции воздуха (затягивание влажного воздуха обратно в воздухозаборные жалюзи градирни).

Наконец, координация работы всех локальных систем технологического процесса и обмен между ними информацией в рамках АСУ ТП второго уровня в среде Ethernet позволяет оптимизировать и инициализировать функционирование всего производственного процесса с единого диспетчерского поста, принципиальная схема которого показана рис. 3.

Кроме того, системой автоматизации выполняются следующие функции:

- контроль состояния аппаратов в схеме управления электродвигателями вентиляторов (реле протока масла редуктора, положения переключателя выбора управления);
- контроль температуры и протока масла в редукторах вентиляторов с выработкой предупредительных сигналов и команды на отключение вентиляторов при получении аварийных сигналов;
- получение информации от расходомеров горячей воды, подаваемой на градирню из насосной станции;
- получение из насосной станции информации от управляющего контроллера и выработка соответствующей команды управления вентиляторам градирни в аварийном режиме;
- отображение информации о ходе технологического процесса в форме мнемосхемы (видеокадра) на мониторах ПК с подачей звукового (голосового) сигнала при аварийных ситуациях;
- ведение протокола событий с возможностью вывода на печать данных, полученных за заданный промежуток времени (смена, сутки).

В перспективе возможно включение данной локальной автоматизированной системы управления в АСУ ТП оборотного водоснабжения.

В состав аппаратуры рассматриваемой системы автоматизации входят следующие приборы и устройства:

- термопреобразователи сопротивления для измерения температуры с характеристикой Pt100;
- модули ADAM-6015 – преобразователи аналоговых сигналов от термопреобразователей сопротивления в цифровые данные, передаваемые в ПК по локальной сети Ethernet;
- модуль ADAM-6017 – преобразователь токовых сигналов 4...20 мА в цифровые данные, передаваемые в ПК по локальной сети Ethernet;

- модули ADAM-4572 – шлюзы передачи данных по последовательному интерфейсу RS-485 с протоколом ModBus от ПЧ и управляющего контроллера насосной станции на ПК по локальной сети Ethernet;
  - коммутатор локальной сети Ethernet;
  - промышленные компьютеры IPC-510-SYS1-3 (2 шт.) фирмы Advantech с клавиатурой и манипулятором;
  - мониторы с жидкокристаллической индикацией;
  - принтер лазерный формата А4;
  - источники питания  $\sim 220/24\text{ В}$ ;
  - источники бесперебойного питания (UPS) для монтажа в стойку – SUA750RM12U (2 шт.) и SC250RM11U (1 шт.) компании APC.
- Применяемые модули семейства ADAM являются изделиями фирмы Advantech.

В проекте приняты к установке два ПК, один из которых является основным, второй – резервным, работающим в режиме постоянного включения и сопровождения программы управления («горячий» резерв).

Аппаратура автоматизации, устанавливаемая в помещении операторной, комплектуется в стандартный девятнадцатидюймовый шкаф TS8 фирмы Rittal (рис. 4). В этом же помещении размещается стол оператора, на котором устанавливаются мониторы, принтер, клавиатуры и манипуляторы.

Для подключения термопреобразователей сопротивления предусмотрены кабели типа МКЭШ, локальная сеть Ethernet выполняется кабелем типа витая пара категории 5.

### АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ

Для стабилизации температуры охлажденной воды на уровне  $t_0 = 28^\circ\text{C}$  и построения системы автоматического регулирования скорости вращения вентилятора градирни найдена аналитическая модель  $t_0 = f(\omega)$  процесса охлаждения воды в градирне с учётом всех возмущений. В результате можно воспроизводить аналитически и моделировать на компьютере в среде MatLab все динамические процессы градирни до реализации алгоритмов на объекте [3].

В связи с ярко выраженным случайным (стохастическим) характером возмущений – метеофакторов и напора насосов – аналитическую модель можно получить путём статистической об-

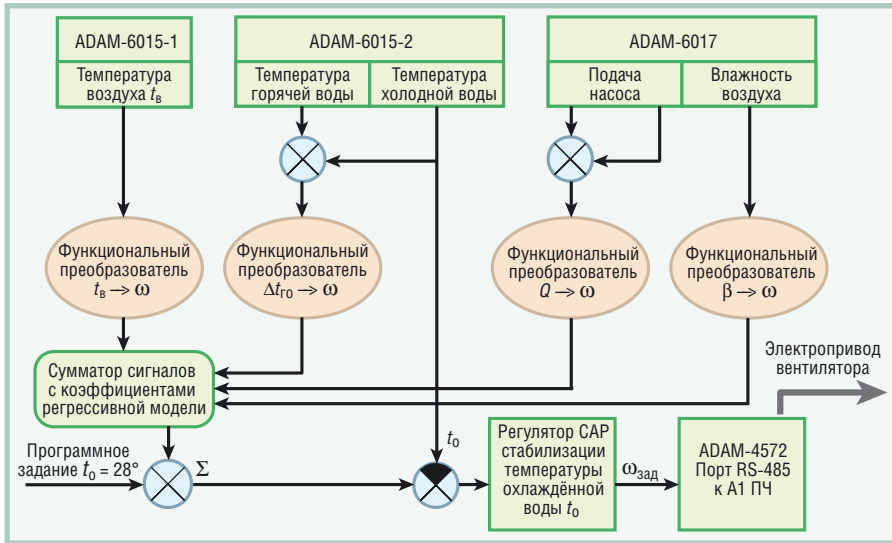


Рис. 5. Преобразование сигналов в системе управления скоростью вентилятора градирни

работки большого массива экспериментальных данных. Подобные регрессионные модели, а также алгоритмы управления электроприводом ПЧ-АД вентилятора и стабилизации температуры охлажденной воды по командам ПК можно реализовать на основе схемы, представленной на рис. 5, и модели преобразования сигналов в контуре САР (рис. 6). Для этого необходимо получить параметры  $a_j$  линейной модели вида:

$$\omega_{\text{зад}} = a_1 \Delta t_{\text{Г0}} + a_2 t_{\text{В}} + a_3 \beta + a_4 Q + \epsilon,$$

которые определяют путём статистической обработки экспериментальных данных (число замеров 50-100).

Однако, судя по представленным на рис. 7 зависимостям  $\omega = f(\beta, t_{\text{В}})$ , практи-

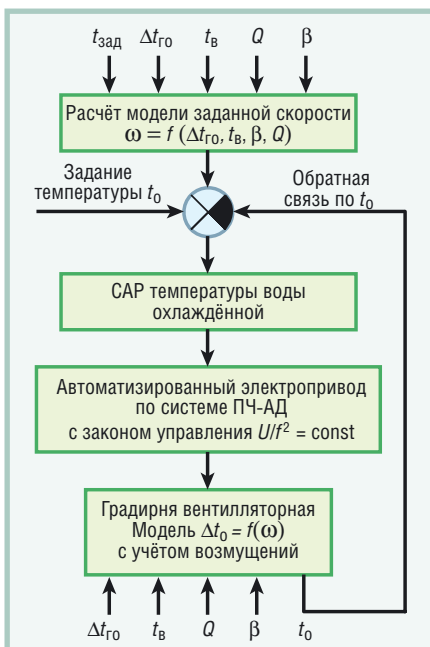


Рис. 6. Модель преобразования сигналов в замкнутой системе управления скоростью электропривода вентиляторной градирни

чески все такого рода характеристики являются нелинейными, близкими по виду к функциям  $y = x^n$  при  $n > 1$ . Поэтому подобную регрессионную модель и алгоритм управления представляем в виде:

$$\omega_{\text{зад}} = A (\Delta t_{\text{Г0}})^a (t_{\text{В}})^b (\beta)^c (Q)^d (\epsilon)^g,$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $a, b, c, d, g$  – показатели интенсивности каждого из возмущающих воздействий, включая помехи и неучтённые атмосферные возмущения  $\epsilon$  (интенсивность и направление ветра, суточные изменения давления, наличие и характер осадков).

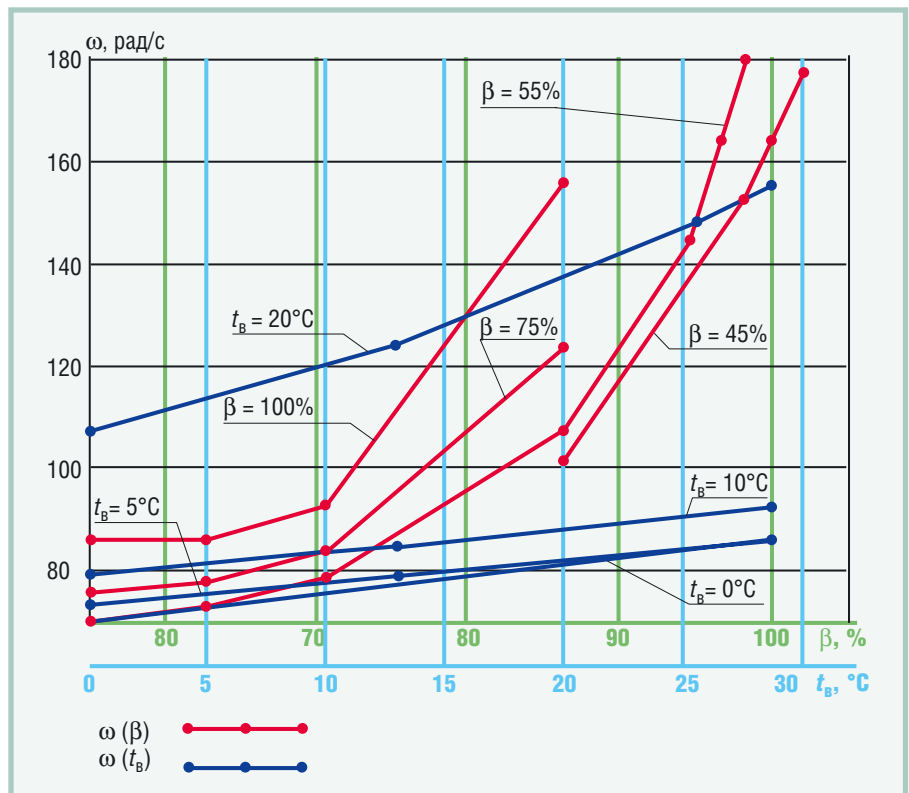


Рис. 7. Экспериментальные зависимости, характеризующие охлаждающие возможности градирни

В зависимости от конкретных требований к точности задания скорости вентилятора и поддержания стабильной температуры охлажденной воды используются либо линеаризованные (точность до 10%), либо нелинейные регрессионные алгоритмы. Во втором случае точность определяется совокупной точностью датчиков и коэффициентов в расчётном уравнении.

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Анализ и проверку адекватности взаимодействия разработанных аппаратных и программных средств АСУ ТП водооборотной системы с вентиляторными градирнями целесообразно проводить путём компьютерного моделирования в среде MatLab 6.5 и физического макетирования системы малой мощности. Моделирование технологических процессов производилось в пакете Simulink. Параметры каналов управления ПЧ-АД и обратной связи по температуре воды соответствовали проектным значениям (рис. 8, условные обозначения на схеме являются общепринятыми в выбранной среде моделирования). Для имитации действия возмущений на саму градирню в систему были введены два функциональных блока преобразований, обес-

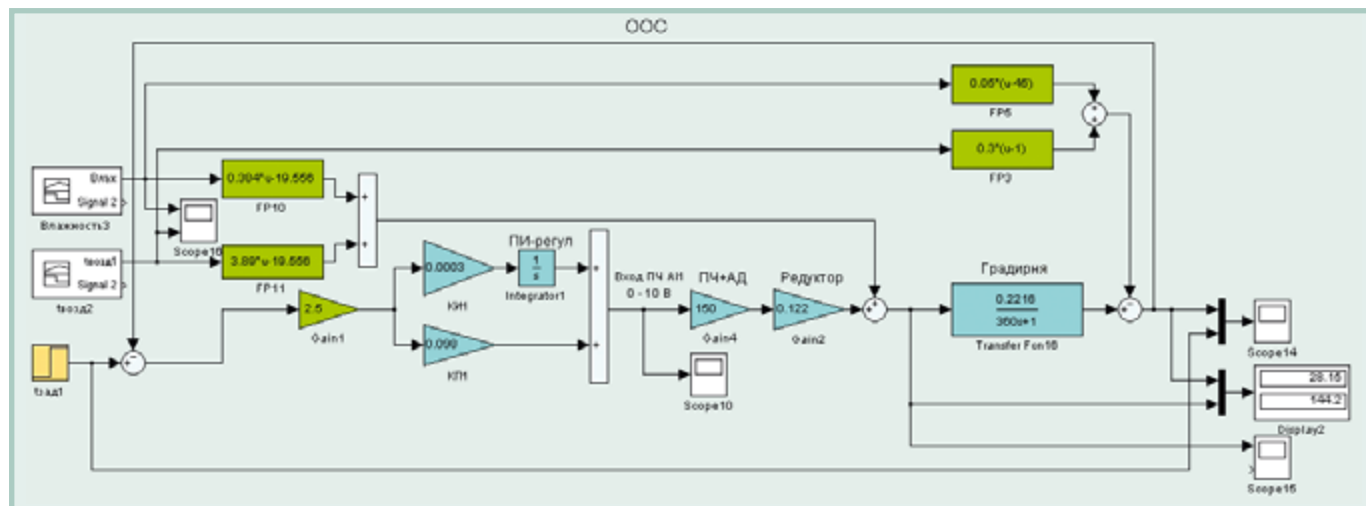


Рис. 8. Структурная схема модели САУ водооборотной системы, учитывающей действия метеорологических возмущений (моделирование в среде MatLab 6.5)

печивающих приращение к температуре воды при изменении метеорологических и технологических условий испарительного охлаждения в вентиляторной градирне.

Получен достаточный объём наглядных результатов, подтверждающих корректность реализации данного проекта. Например, на рис. 9 приведены временные диаграммы переходных процессов при линейном и ступенчатом изменении возмущений, дейст-

вующих на водооборотную систему с вентиляторными градирнями. Данные результаты в совокупности с исследованиями на макете электропривода мощностью 300 Вт позволяют подтвердить эффективность и адекватность разработанного проекта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вентиляторные градирни являются центральным и важнейшим звеном технологической цепи отвода тепла в

водооборотных системах предприятий, так как путём испарения и теплообмена с атмосферным воздухом они позволяют снизить температуру воды до требуемых значений. Важно и то, что, изменяя скорость вращения вентилятора градирни, можно регулировать выходные параметры водооборота в зависимости от сезонных, метеорологических и технологических изменений большого числа факторов.

При высоких требованиях к статической точности стабилизации главного технологического параметра — температуры охлажденной воды — необходимо оптимизировать соответствующие регуляторы АСУ ТП с учётом нескольких видов возмущений и возможности реализации принципа декомпозиции при синтезе САУ.

В рассмотренном проекте разработана универсальная автоматизированная система регулирования температуры охлажденной воды через управление электроприводом вентиляторной градирни. На основе теории вероятностей и методов математической статистики разработана совокупность регрессионных алгоритмов для адекватного зада-

ния скорости вращения ПЧ-АД вентилятора градирни, позволяющая точно учесть влияние всех критичных видов возмущений. Кроме того, разработана и синтезирована замкнутая автоматизированная система стабилизации температуры охлажденной воды на базе управления электроприводом ПЧ-АД, инвариантная к действию всех основных метеорологических и технологических возмущений.

Средства автоматизированного управления электроприводом вентилятора градирни позволяют оптимизировать режимы энергосбережения, мониторинга и диагностики работы водооборотной системы и интегрировать её в АСУ ТП всего производства. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Киянов Н.В. От электромонтажных работ до систем комплексной автоматизации // Новости приводной техники. 2006. № 12. С. 1.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справ. пособие / Под общ. ред. В.С. Пономаренко. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 376 с.
3. Крюков О.В. Микропроцессорное управление машинами двойного питания: Учеб. пособие / Нижегород. гос. тех. ун-т. — Н. Новгород, 1999. — 118 с.

Авторы — сотрудники

ООО «Интермодуль»

Телефон/факс: (8312) 18-4183,  
18-9203