



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).

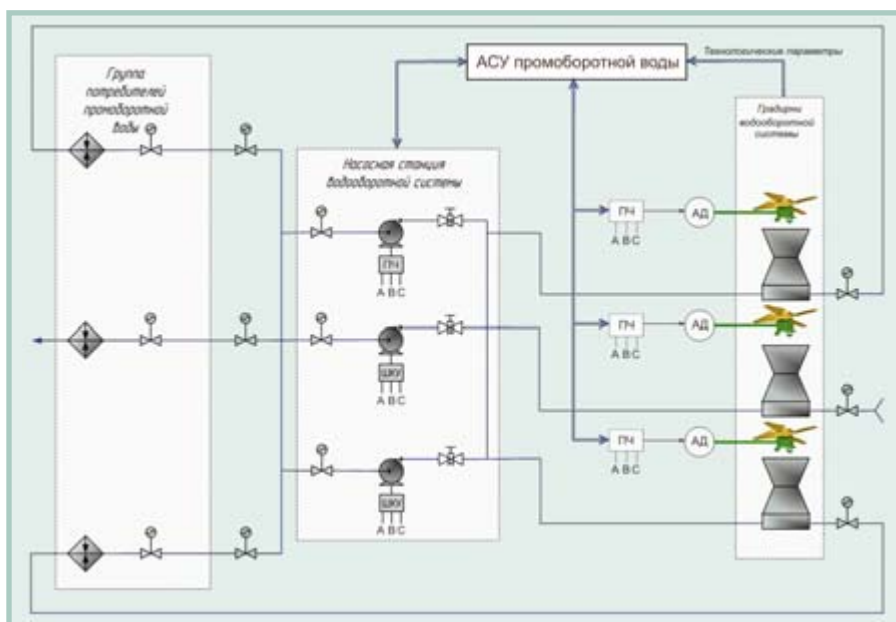
Частичная автоматизация технологического процесса, предполагающая использование программируемого логического контроллера, обеспечивает:

- 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 (промышленной) 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 β ($\beta = 50...100\%$) и подачи насоса Q . Так как скорость вращения вентилятора ω 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 распылённых 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-

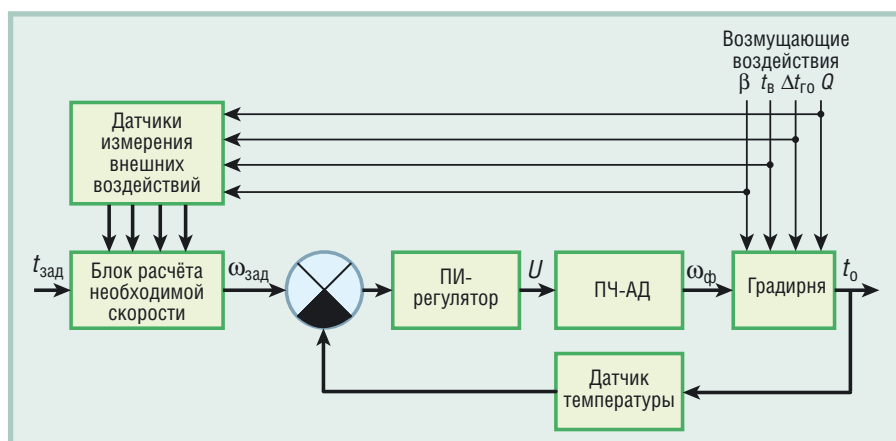
матизации вентиляторной градирни имеет:

- 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 неучтённых факторов.

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

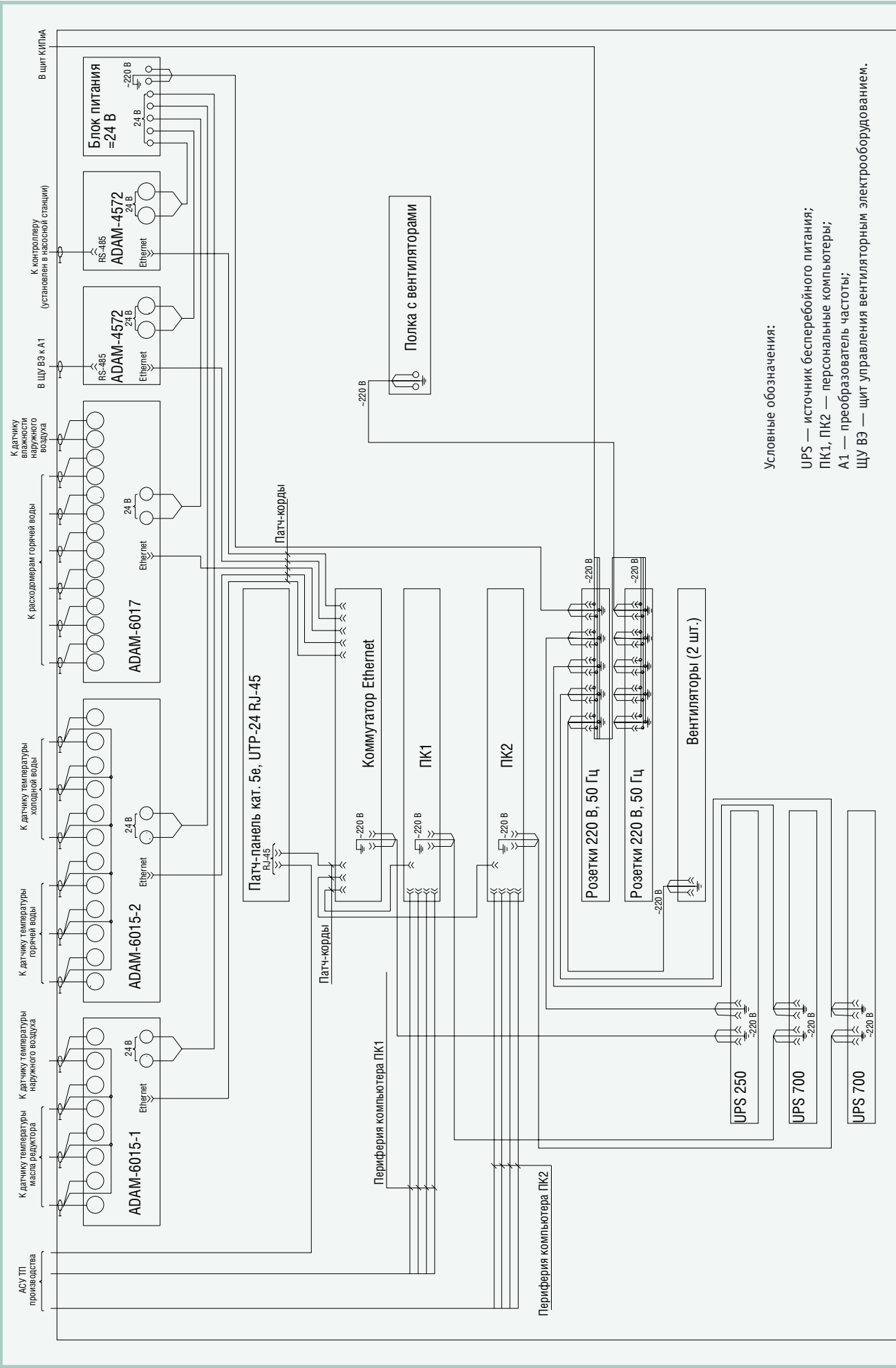
Преобразователь частоты для асинхронных двигателей на базе Altivar38 позволяет реализовать энергоэкономичный закон скалярного регулирования скорости электропривода ПЧ-АД (преобразователь частоты — асинхронный двигатель) с вентиляторной нагрузкой $U/f^2 = \text{const}$ (U и f — величины напряжения и частоты 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; β — 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



Условные обозначения:

UPS — источник бесперебойного питания;
ПК1, ПК2 — персональные компьютеры;
А1 — преобразователь частоты;
ЩУ ВЗ — щит управления вентиляторным электрооборудованием.

Рис. 3. Принципиальная схема единого диспетчерского поста, координирующего взаимодействие локальных систем АСУ ТП



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 потока масла редуктора, положения переключателя выбора управления);
- контроль температуры и потока 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 $\sim 220/\pm 24\text{ В}$;
 - 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-

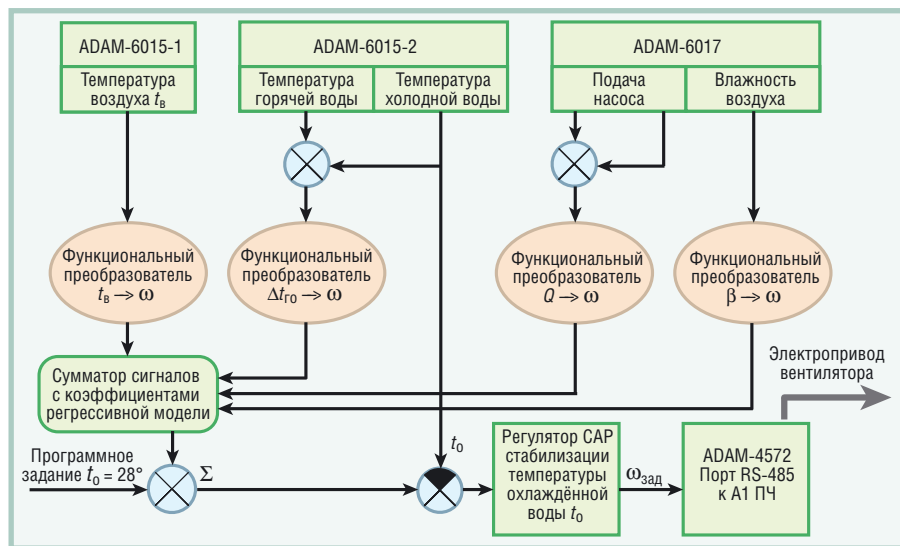


Рис. 5. Преобразование сигналов в системе управления скоростью вентилятора градирни

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:

$$\omega_{\text{зад}} = a_1 \Delta t_{r0} + a_2 t_b + a_3 \beta + a_4 Q + \epsilon,$$

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

Однако, судя по представленным на рис. 7 зависимостям $\omega = f(\beta, t_b)$, практи-

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 представим в виде:

$$\omega_{\text{зад}} = A (\Delta t_{r0})^a (t_b)^b (\beta)^c (Q)^d (\epsilon)^g,$$

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

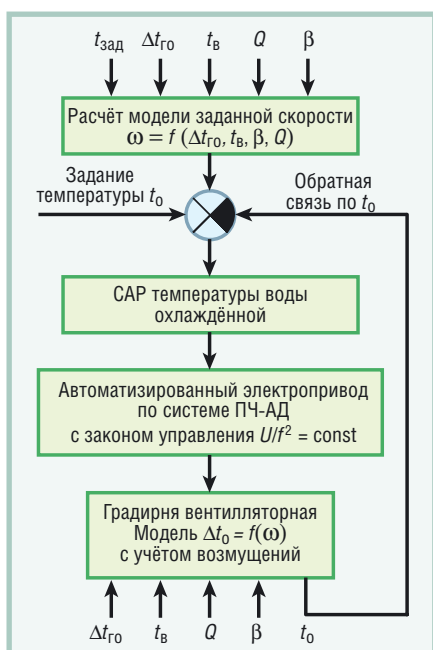


Рис. 6. Модель преобразования сигналов в замкнутой системе управления скоростью электропривода вентиляторной градирни

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-

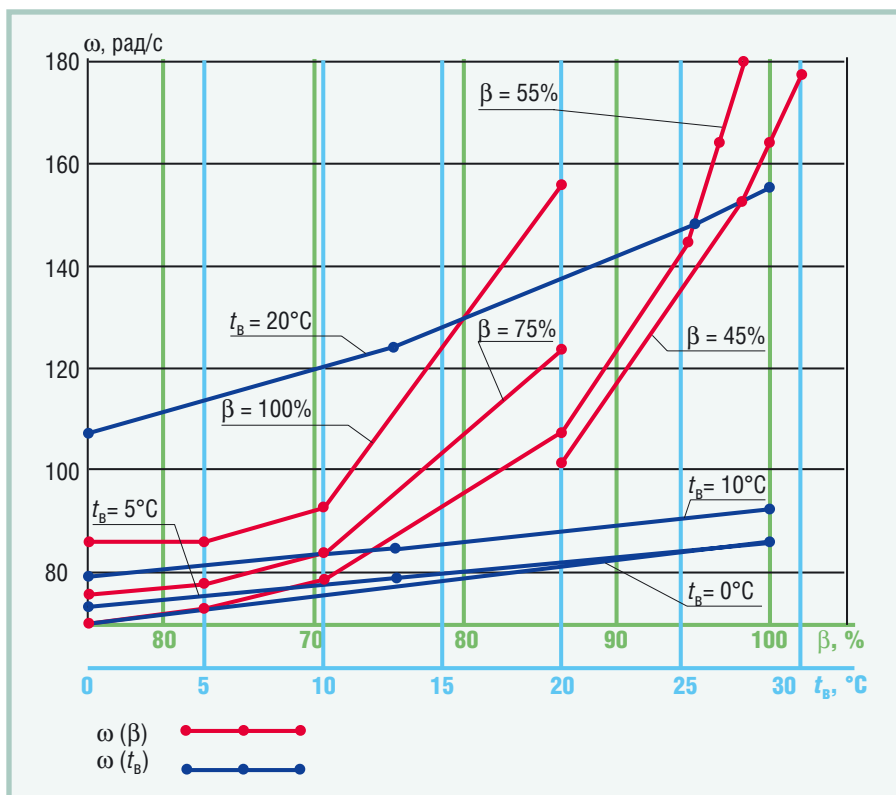


Рис. 7. Экспериментальные зависимости, характеризующие охлаждающие возможности градирни

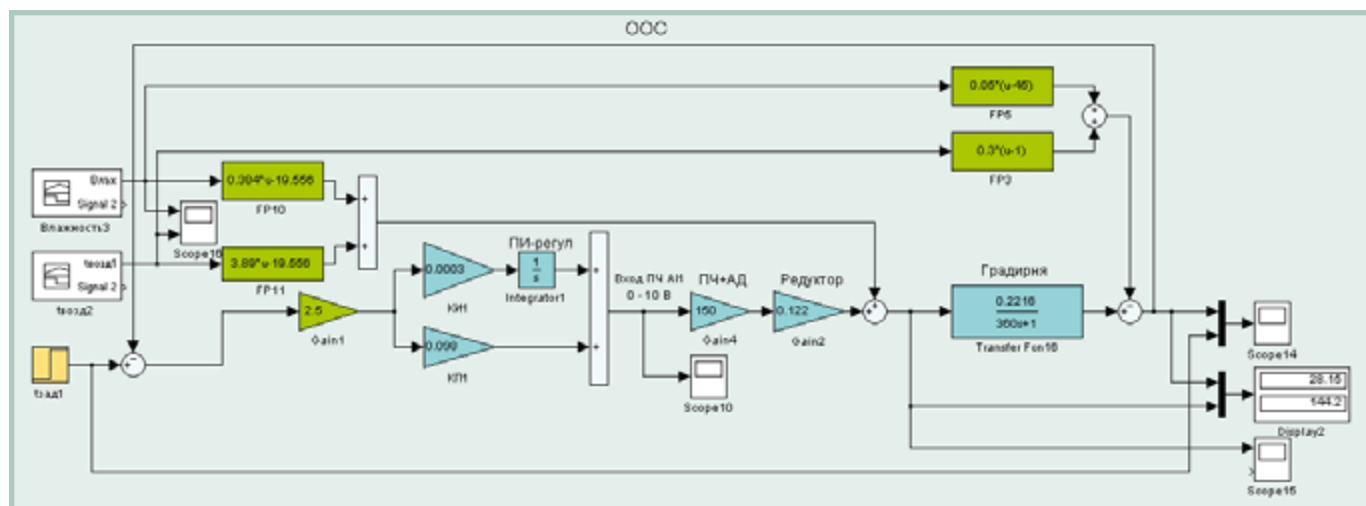


Рис. 8. Структурная схема модели САР водооборотной системы, учитывающей действия метеорологических возмущений (моделирование в среде MatLab 6.5)

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.

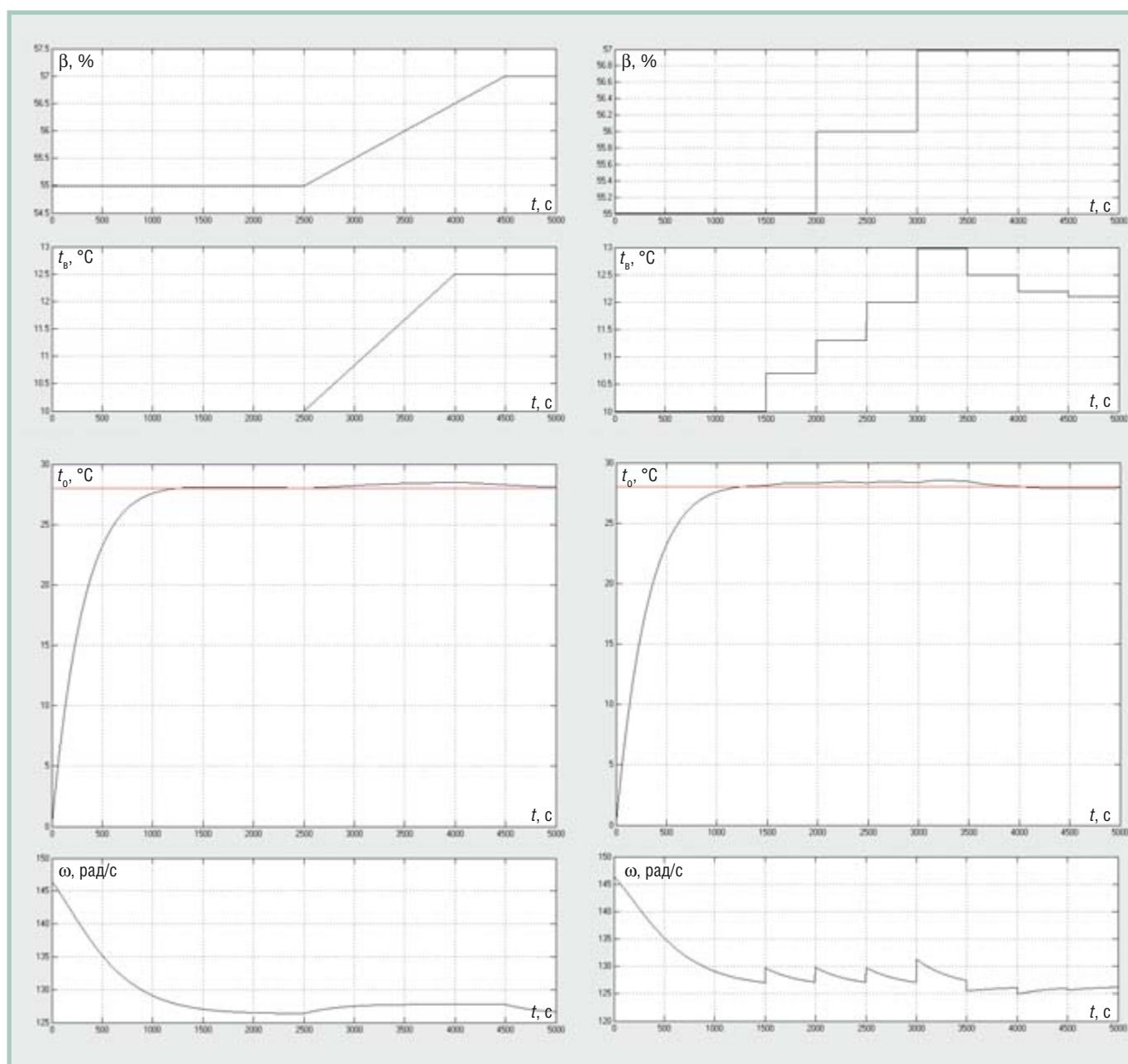


Рис. 9. Полученные посредством моделирования временные диаграммы переходных процессов при изменениях возмущений, действующих на водооборотную систему с вентиляторными градирнями

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

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**