



## АСУ ВОДООБОРОТНЫМИ СИСТЕМАМИ С ГРАДИРНЯМИ

О.В. Крюков (ОАО «Гипрогазцентр»)

*Рассмотрены особенности проектирования современных систем промышленного водооборота с вентиляторными градирнями. Представлен анализ применения аппаратных средств и инвариантных алгоритмов АСУ насосами и вентиляторами градирен для стабилизации температуры охлажденной воды.*

*Ключевые слова: системы промышленного водооборота, вентиляторные градирни, энергосберегающие алгоритмы, инвариантное управление, электропривод вентиляторов градирен.*

### Введение

Тенденция морального и физического старения производственных механизмов значительной части жизненно важных отраслей промышленности со всей очевидностью мотивирует необходимость внедрения современной и энергоэффективной техники в России. Особенно это важно в нефтегазовой, топливно-энергетической, горнодобывающей и металлургической промышленности, где сейчас создаются новые производства с реализацией самых совершенных наукоемких ТП.

Практически во всех отмеченных отраслях используется оборудование, которое для нормальной эксплуатации требует охлаждения (нагнетатели, паровые турбины, доменные печи, обмотки генераторов, конденсаторные и компрессорные системы). Наиболее предпочтительным способом отвода низкопотенциального тепла от промышленных агрегатов (до 85%) является организация работы водооборотных систем с градирнями, что обусловлено эффективностью, экономичностью и экологичностью данной системы эвакуации тепла, а также возможностями автоматизации и температурной оптимизации параметров всего ТП.

Градирни являются центральным и важнейшим звеном технологической цепи отвода тепла, так как позволяют снизить температуру воды до требуемых значений путем испарения и теплообмена с атмосферным воздухом. Кроме того, изменяя скорость вращения вентилятора, можно регулировать выходные параметры водооборота в зависимости от сезонных, метеорологических и технологических изменений большого числа факторов. Наконец, средства автоматизированного электропривода вентилятора градирни позволяют обеспечить оптимальные режимы энергосбережения, мониторинга технического состояния оборудования и диагностики работы водооборотной системы с интеграцией ее в АСУ всего производства.

В настоящее время за рубежом и в нашей стране достигнут высокий уровень совершенствования конструктивных и тепломеханических элементов оборудования градирен [1,2]. Однако вопросам раз-

работки оптимальных энергосберегающих систем электрооборудования градирен и системной автоматизации водооборотного цикла уделяется недостаточное внимание. В качестве привода вентилятора градирни до сих пор используются неэкономичные нерегулируемые системы, которые решают только частные вопросы, не обеспечивая реализации комплекса задач энергосбережения, оптимизации и комплексной автоматизации водооборотных систем.

Это связано с тем, что градирня как объект управления представляет собой сложное гидротехническое сооружение с многофазовыми теплотехническими процессами, зависящими от большого числа детерминированных и случайных внешних воздействий. Подобные воздействия приводят к значительному изменению тепловой мощности и охлаждающей способности градирни, не обеспечивая управления водооборотом.

Кроме того, при высоких требованиях к статической точности стабилизации температуры охлажденной воды для многих ответственных и энергоемких объектов и технологий, необходимо учитывать несколько возмущений при синтезе САР. К тому же, независимо от режимов работы оборудования постоянно повышаются требования надежности и безотказности работы комплекса оборудования водооборотных систем. Выполнение этих требований возможно только путем оснащения АСУ встроенной системой мониторинга и прогнозирования технического состояния оборудования, проектирование которой должно вестись синхронно с разработкой электрооборудования градирни и других систем водооборотного цикла.

### Анализ требований к водооборотным системам с градирнями

Главная особенность большинства производственных технологий ТЭК связана с необходимостью охлаждения мощного и энергоемкого оборудования с удалением тепла в широком интервале температур. Окончательное снижение температуры водного теплоносителя до 25...35 °С, как правило, производится

Таблица 1. Данные об использовании оборотной воды в промышленности

Отрасль	Расход воды % на охлаждение	Водооборот, %	Подача, м <sup>3</sup> /ч (наибольшая)	Температура воды, °С	
				горячая	охлажденная
Энергетика	96	60	1000	35...45	25...30
Нефтехимия	95	94	100	40...45	25...28
Химическая	74...95	64...96	100	40...45	25...30
Металлургия	75	93	300	35...45	30...35

при помощи системы оборотной воды с градирнями, так как это самый дешевый способ, позволяющий сэкономить не менее 95% свежей воды. В России для охлаждения энергоемкого оборудования используется 105...130 км<sup>3</sup> оборотной воды или 65% производственной воды по всем отраслям промышленности. Требования, предъявляемые к температуре охлажденной воды  $t_2^\circ$  (главному технологическому параметру), диктуются конкретным производством и эксплуатационными свойствами оборудования, исходя из экономичности и надежности его работы, и определяют выбор типа градирни. В табл. 1 приведены данные по использованию оборотной воды в различных отраслях промышленности и требования к ее температуре в летний период.

Необходимо отметить, что температура охлажденной в градирнях оборотной воды существенно влияет на оптимальную работу всего технологического оборудования, как показано в табл. 2. Так, недоохлаждение воды относительно ее расчетной температуры приводит к снижению долговечности работы агрегатов или объемов выработки продукции, а переохлаждение – к ухудшению ее качества и перерасходу энергии, а иногда и к нарушению ТП.

Конструктивные элементы градирен (вентиляторы и жалюзи) являются единственным каналом воздействия на охлаждающую способность водооборота. При этом вентиляторные градирни (ВГ) получили наибольшее распространение в промышленности благодаря эффективности теплообмена, лучшей удельной тепловой нагрузке, глубине охлаждения оборотной воды, капитальным затратам, минимуму выбросов и возможности автоматизации.

Анализ особенностей работы вентиляторов ВГ водооборотных систем различных предприятий и актуальность внедрения энергосберегающих технологий и требований надежности позволил сформулировать следующие требования к автоматизированному электроприводу (АЭП) вентиляторов:

- продолжительный режим со спокойным характером нагрузки без противодействия;
- необходимость автоматически учитывать метеорологические и технологические изменения параметров стохастического характера;
- высокие энергетические показатели (КПД,  $\cos\varphi$ ) и устойчивость работы в статических режимах с возможностью снижения потребляемой мощности при регулировании;
- необходимость работы вентилятора в зимний период на низких скоростях для предотвращения наледи на лопастях, разрушения подшипников и редуктора, а также "схлопывания" воздушного потока над градирней;
- плавный пуск с большими маховыми массами вентилятора и моментами инерции;
- стабилизация температуры охлажденной воды путем регулирования скорости вращения вентилятора в замкнутой системе с отрицательной обратной связью по  $t_2^\circ$ ;
- надежность и долговечность работы средствами непрерывного мониторинга и прогнозирования технического состояния всех элементов оборудования водооборота;
- необходимость интегрирования локального АЭП вентилятора в единую АСУТП.

**Алгоритмы управления и стабилизации температуры воды ВГ**

Для получения алгоритмов управления АЭП вентиляторов ВГ в условиях стохастической неопределенности применяется метод регрессионного анализа [2].

Как показал анализ большого массива экспериментальных данных ВГ в реальных условиях эксплуатации, наибольшее влияние на охлаждающую способность градирен и величину установленной мощности АЭП вентилятора (при оптимальных характеристиках оросителей) оказывают две группы факторов: технологические (подача  $Q$  и температура горячей воды  $t_1^\circ$ )

Таблица 2. Влияние температуры охлажденной воды на работу аппаратов ТП

Характер изменения температуры воды	Влияние на показатели работы оборудования
1. Снижение $t_2^\circ$ , подаваемой на конденсаторы турбин ТЭС, на 1 °С	Уменьшение на 1,2...2 г расхода условного топлива на выработку 1 кВт*ч эл. энергии
2. Повышение $t_2^\circ$ , подаваемой на конденсаторы ТЭС, на 1 °С	Снижение вакуума в конденсаторах на 0,5 % или мощности турбины на 0,4 %
3. Снижение $t_2^\circ$ на конденсаторы компрессионных холодостанций на 1 °С	Уменьшение на 2...4 % расхода электроэнергии на привод компрессоров
4. Снижение $t_2^\circ$ на конденсаторы парозежектонных холодостанций на 7 °С	Уменьшение расхода пара с 3,4 до 2,1 т на 4 ГДж вырабатываемого холода
5. Снижение $t_2^\circ$ при расчетах размеров теплообменной аппаратуры заводов нефтехимии на 5 °С (с 30 до 25 °С)	Уменьшение на 23 % площади поверхности охлаждения теплообменников и на 20 % расхода металла на их изготовление
6. Снижение $t_2^\circ$ воды на установке пиролиза нефти мощностью 340 тыс. т/г на 2,3 °С	Рост выработки топливно-энергетических ресурсов в год на 518 тыс. долл США
7. Недоохлаждение воды в летний период относительно ее расчетной температуры на предприятиях химической промышленности	Уменьшение среднегодовой выработки кальцинированной соды на 3,4 %, аммиака – на 10 %, метанола – на 8 %, сернистого натрия – на 4,5 %, уксусной кислоты – на 11%

и метеорологические (температура  $\theta$  и влажность  $\beta$  воздуха). При этом для обеспечения требуемой температуры охлаждаемой воды  $t_2$  номинальная мощность двигателя вентилятора должна рассчитываться, исходя из наибольших возможных значений рассмотренных параметров, а величина скорости вращения вентилятора  $\omega$  – по текущим их значениям.

Значение требуемой для охлаждения воды  $\omega$  нелинейно зависит от всех возмущений, воздействующих на ВГ, что предполагает установку соответствующих датчиков параметров и ввод их значений в компьютер. Экспериментальные данные  $\omega=f(\theta)$  и  $\omega=f(\beta)$  предварительно получены на вентиляторной градирне ВГ-70 СП. Результаты работы использованы при разработке и внедрении АСУ электроприводами мощностью 75 и 90 кВт для вентиляторов градирен водооборотных систем в металлургическом производстве (ЭСПЦ ОАО «Уральская сталь», г. Новотроицк), нефтегазовой (ОАО «Нижегороднефтеоргсинтез», г. Кстово) и горнодобывающей промышленности (ОАО «Чепецкий механический завод», г. Глазов).

В этих условиях для получения функциональной зависимости управления скоростью вращения АЭП вентилятора градирни вида  $\omega_s = f(\Delta t, \theta, \beta, Q)$  при статистической обработке массива экспериментальных данных (в соответствии с методом наименьших квадратов) использована модель линейной регрессии [2].

Таким образом, регрессионные математические модели и алгоритмы управления АЭП вентилятора ВГ при стабилизации температуры охлаждаемой воды можно получить в виде нелинейных и линеаризованных уравнений, которые удобны для реализации адекватного задания частоты АЭП на управляющих промышленных компьютерах.

Результаты расчетов регрессионных алгоритмов проанализированы путем сравнительного моделирова-

ния их с исходными данными на гистограммах, а также методами корреляционного, дисперсионного, ковариационного и факторного анализа [2]. В результате подтвержден факт наличия статистических связей нелинейного характера между температурой охлажденной воды и параметрами стохастических возмущений.

Для инвариантного (независимо от внешних возмущений) функционирования системы вся информация о состоянии параметров воздействий должна вводиться и обрабатываться в устройстве управления АЭП. Необходимость в стабилизации оптимальной температуры охлаждаемой воды требует введения отрицательной обратной связи и ПИ-регулирования в САУ  $t_2$  АЭП ВГ.

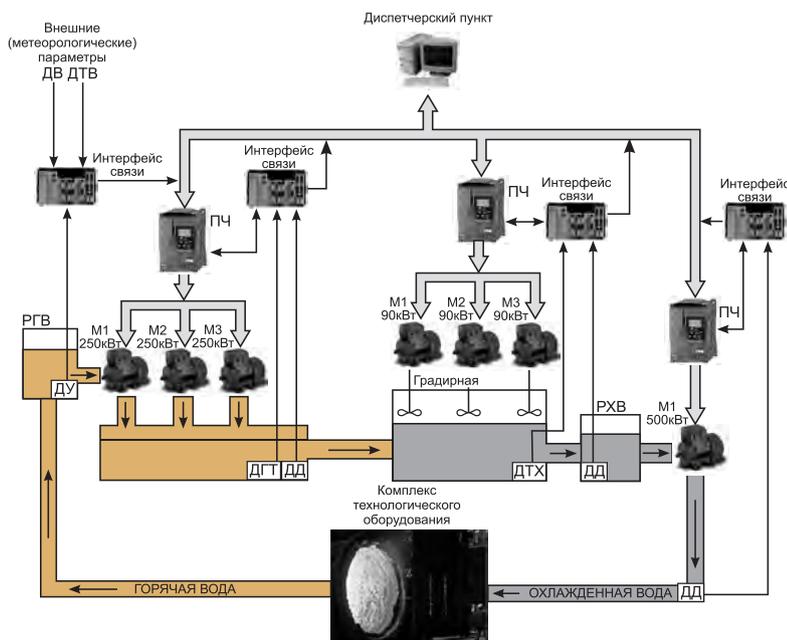
Техническим результатом использования разработанной системы [1] является строгое соблюдение параметров процесса охлаждения воды, что позволяет при минимальных затратах электроэнергии повысить производительность и качество выпускаемой продукции.

Для проверки адекватности разработанных регрессионных алгоритмов управления и стабилизации температуры охлаждаемой воды средствами АЭП ВГ производилось компьютерное моделирование процессов в среде Matlab в пакете Simulink. Параметры каналов управления АЭП и обратной связи по температуре охлаждаемой воды задавались индивидуально под конкретные реализации водооборотных систем. Для одного из вариантов трехсекционной ВГ в момент времени  $t = 2000$  с при съеме информации с датчиков скачком изменились значения влажности  $\beta$  с 55% до 56% и температуры воздуха  $\theta$  с 10,7 °С до 11,3 °С. Это привело к тому, что скорость вращения вентилятора  $\omega$  также увеличилась с 143 с<sup>-1</sup> до 146 с<sup>-1</sup>, что даст возможность снизить завышенное значение температуры воды  $t_2$  до установленного уровня в 28 °С.

**Реализация АСУТП водооборотных систем с ВГ**

Рассмотрим для примера реализованную на ОАО «Чепецкий механический завод» компьютеризированную АСУТП водооборотной системы с ВГ производительностью  $Q = 1000$  м<sup>3</sup>/ч и тремя секциями ВГ площадью 144 м<sup>2</sup> [3]. Для АСУ используются датчики влажности и температуры наружного воздуха; резервуары горячей и холодной воды; датчики температуры горячей и холодной воды; датчики уровня и давления воды в резервуарах; преобразователи частоты для регулирования скорости вращения АЭП насосов подачи горячей воды (250 кВт), холодной воды (500 кВт) и вентиляторов градирни (90 кВт). Синхронизацию обмена информацией обеспечивают четыре интерфейса сети Ethernet для связи с диспетчерским пунктом.

Рассмотренная секционная градирня относится к классу ВГ с противотоком



АСУТП водооборотной системы с тремя секциями ВГ

и предназначена для охлаждения оборотной воды, нагретой технологическими агрегатами в диапазоне температур  $t_1 = 30...40\text{ }^\circ\text{C}$ , до стабильной температуры  $t_2 = 28\text{ }^\circ\text{C}$  в условиях стохастического воздействия изменений температуры ( $\theta = 0...35\text{ }^\circ\text{C}$ ) и влажности ( $\beta = 20...100\%$ ) воздуха, подачи циркуляционных насосов ( $Q = 50...100\%$ ) и температурного перепада горячей/охлажденной воды ( $\Delta t = 2...12\text{ }^\circ\text{C}$ ) (см. рис.).

Для АСУТП водооборота разработана методика синтеза алгоритмов и аппаратная поддержка для мониторинга и прогнозирования технического состояния в системе с ВГ. Она основана на представлении АЭП абстрактной динамической системой, функционирование которой состоит в изменении состояния системы под воздействием внешних и внутренних причин. Базирующиеся на таком подходе модели объекта позволяют синтезировать не только инвариантный к глубине диагностирования и структуре аппаратных средств алгоритм диагностической процедуры, но и применить унифицированные первичные датчики с измерением различных физических величин.

Предложенный подход позволяет путем разбиения диагностирующего автомата на иерархическую структуру подавтоматов рационально реализовать модели. Устройства верхнего уровня при этом – универсальны, а устройства нижнего уровня сравнительно просты для типовых АЭП ВГ. В них объединены следующие функции: первичный датчик измеряемого параметра и схема анализа с информацией о состоянии параметра в норме.

При реализации АСУ водооборотной системы использован принцип экспертного подхода, когда экспертные данные необходимы в качестве эталона для оценки текущего состояния системы АЭП. Они упорядочены и хранятся в памяти, составляя базу экспертных и базу реальных данных. Представленный алгоритм реализует одновременно две системы: компенсирующую инвариантную САР и экспертную систему. Работа первой заключается в прогнозировании аварийных режимов и недопущении их путем превентивного изменения (уменьшения, ограничения или даже отключения) соответствующих параметров, а работа экспертной системы заключается в прогнозе неисправностей с оповещением и советом оператору.

Для прогноза в режиме реального времени применены алгоритмы нечеткой логики с языковым синтаксисом, использующим лингвистические переменные. При этом использована предварительная фаззификация измеряемых переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения с помощью несложной схемы определяется прогнозируемое значение этого параметра. Система может быть реализована как автономно на специализированных Fuzzi-контроллерах, так и в составе компьютеров.

*Крюков Олег Викторович — канд. техн. наук, доцент, гл. специалист ОАО «Газпрогазцентр».*

*Контактный телефон (831) 428-25-84.*

*Http://www.gunprogazцентр.pф E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru*

Для реализации всех рассмотренных выше функций мониторинга, управления и регулирования АСУТП водооборота с ВГ разработано ПО GRADIRNY. Программа написана на объектно-ориентированном языке Visual Basic с использованием среды разработки ADAM View. Программа функционирует в среде ОС Windows NT и представляет собой человеко-машинный интерфейс (HMI) для работы с данными в реальном времени через OPC-сервер от КИП и А, входящей в схему управления АЭП ВГ. Интерфейс программы разработан в виде графических форм (окон) с использованием управляющих элементов (кнопок, индикаторов, «условных» элементов). Главное окно программы дополнено некоторым числом «всплывающих» (подчиненных) окон.

Технико-экономический эффект внедрения АЭП вентилятора ВГ и быстрая окупаемость обеспечивается: снижением энергопотребления на 22...60% за счет регулируемого АЭП с алгоритмами, инвариантными к метео- и технологическим условиям работы; точным соблюдением оптимальных параметров ТП производства, приводящим к максимальной производительности охлаждаемых аппаратов и стабильному качеству выпускаемой продукции; минимальными финансовыми и эксплуатационными затратами на ТО и ремонт вентиляторного оборудования на протяжении всего срока службы. Разработанные системы АЭП ВГ внедрены на предприятиях нефтеперерабатывающей, горнодобывающей и металлургической промышленности.

Положительный опыт реализации проектов АСУ водооборотными системами с градирнями на предприятиях нефтегазовой, горнодобывающей и металлургической промышленности и представленные методики целесообразно распространить на аналогичные ТП и системы:

- насосы и компрессоры теплообменников с паронагревателями, работающими в режиме on-line с идентификацией параметров;
- воздухоподогреватели котлоагрегатов, оснащенных топкой «кипящего слоя»;
- вентиляторы и транспортеры барабанных и трубных сушилок с необходимостью поддержания параметров продуктов с точностью  $\pm 1\%$ ;
- аппараты воздушного охлаждения газа после его компримирования в газоперекачивающих агрегатах компрессорных станций.

#### Список литературы

1. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография // НГТУ, Н. Новгород, 2007.
2. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. 2008. №9.
3. Киянов Н.В., Крюков О.В. Автоматизация управления водооборотной системой с вентиляторными градирнями // Автоматизация и современные технологии. 2008. №7.