

УДК 621.51

**О.Н. Лупинос, Д.В. Пилипенко, Р.В. Федюн**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматизации и телекоммуникаций, кафедра электронной техники  
E-mail: [olyalupinos@rambler.ru](mailto:olyalupinos@rambler.ru) , [faza@lanos.com.ua](mailto:faza@lanos.com.ua) , [frv@list.ru](mailto:frv@list.ru)

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИЕЙ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

### *Abstract*

*Lupinos O.N., Pilipenko D.V., Fedyun R.V. Automatic control the compressor cleansing buildings. The question of minimization of expenses of electric power is considered. Grounded and resulted system of automatic control compressors.*

**Keywords:** *cleansing buildings, compressors, perturbation, PI-regulator, mathematical modeling.*

### *Анотація*

*Лупинос О.М., Пилипенко Д.В. Федюн Р.В. Автоматичне управління компресорною станцією очисних споруд. Розглянуто питання мінімізації споживання електроенергії. Обґрунтовано структуру й розроблена система автоматичного управління компресорною установкою. Ключові слова: очисні споруди, компресорна установка, збурюючі впливи, ПІ-закон управління, математичне моделювання.*

### *Аннотация*

*Лупинос О.Н., Пилипенко Д.В. Федюн Р.В. Автоматическое управление компрессорной станцией очистных сооружений. Рассмотрены вопросы минимизации потребления электроэнергии. Обоснована структура и разработана система автоматического управления компрессорной установкой.*

**Ключевые слова:** *очистные сооружения, компрессорная установка, возмущающие воздействия, ПИ-закон управления, математическое моделирование.*

**Общая постановка проблемы.** Ситуация с природными запасами воды в Украине очень сложная и тем более в Донецкой области, которая по соответствующим показателям находится на предпоследнем месте среди регионов Украины.

Дальнейшая эксплуатация энергоёмкого оборудования в водопроводном хозяйстве при наличии устоявшейся тенденции последних лет относительно повышения тарифов на электроэнергию может нарушить существующую систему водоснабжения или сделать стоимость её услуг непомерной для населения.

Объектом исследования является компрессорная станция очистных сооружений, предназначенных для очистки сточных вод г.Донецка. Донецкие очистные сооружения представляют собой большой комплекс, автоматизация которого в последнее время становится актуальным вопросом для коммунального предприятия «Донецгорводоканал».

Технологический процесс очистки сточных вод довольно энергоемок. Существенное потребление электроэнергии происходит на этапе биологической очистки воды в аэротенках, очистка воды в которых осуществляется при помощи микроорганизмов и кислорода воздуха, подаваемого мощными компрессорами.

Концентрация кислорода в аэротенках должна поддерживаться на определенном уровне, который зависит от многих факторов. Периодически, при помощи лабораторных исследований, уста-

навливается концентрация кислорода в аэротенке и принимается решение о повышении или понижении объема подачи воздуха от компрессорной станции. Такой принцип работы очистных сооружений имеет явные недостатки. Требуется значительные временные затраты на определения концентрации кислорода связанные с использованием ручного труда работников и значительным расстоянием между аэротенками и лабораторным корпусом. Так же нет возможности своевременно реагировать на возмущающие факторы, которые приводят к изменению количества необходимого потребляемого сжатого воздуха, что в свою очередь приводит к излишнему потреблению электроэнергии. Принцип управления компрессорами является грубым и из-за этого осуществляется с большим запасом подаваемого сжатого воздуха. Это не является эффективным способом использования компрессоров и ведет к неоправданному перерасходу электроэнергии.

**Постановка задач исследований.** Для построения системы автоматического управления компрессорами на очистных станциях необходимо:

- произвести анализ технологического процесса очистки сточных вод;
- выявить основные возмущающие факторы, влияющие на протекание данного технологического процесса;
- проанализировать общий принцип функционирования очистных сооружений при внедрении системы управления компрессорами;
- составить общую структурную схему системы автоматического управления компрессорами;
- произвести математическое моделирование, подтверждающее возможность реализации системы управления.

**Решение задач и результаты исследования.** Очистные сооружения используются для очистки сточных вод от различных загрязнений. После очистки вода должна отвечать определенным показателям и быть безопасной для окружающей среды. Очистку сточных вод производят механическим и биохимическим методом (основан на способности микроорганизмов использовать в качестве питательного субстрата многие органические и некоторые неорганические соединения, содержащиеся в сточной воде).

Донецкие очистные сооружения состоят из следующих технологических сооружений: дом решеток, песколовки, преаэрационные, первичные радиальные отстойники, аэротенки, вторичные радиальные отстойники, контактные резервуары, что представляет собой стандартную схему при очистке воды биохимическим методом. Принцип действия сооружений биохимической очистки основан на методах непрерывного культивирования микроорганизмов.

Дом решеток предназначен для выделения из сточной воды нерастворенных минеральных и органических примесей. Песколовки необходимы для улавливания из сточных вод песка и других нерастворимых загрязнений. Первичные отстойники нужны для улавливания из сточных вод средне и мелко дисперсных примесей. На данном этапе заканчивается механическая очистка сточных вод. В аэротенках используют микроорганизмы (активный ил) для очистки воды от органических загрязнений. Вторичные отстойники необходимы для разделения очищенной воды от осадка активного ила. Контактные резервуары необходимы для обеззараживания очищенных сточных вод хлором.

Основной этап очистки сточных вод происходит в аэротенках. Для обеспечения нормального процесса биохимической очистки в аэротенках необходимо непрерывно подавать воздух. Это необходимо для обеспечения жизнедеятельности активного ила и для поддержания его во взвешенном состоянии. За счет своей жизнедеятельности активный ил биологически окисляет и разрушает коллоидные и растворенные органические вещества. В результате этого образуется постоянный прирост активного ила, что обеспечивает непрерывность биологической очистки стоков. Интенсивность и эффективность биохимической очистки определяется скоростью размножения бактерий, которые образуют целые биоценозы микроорганизмов. На рис.1 приведена схема очистки сточных вод, которая отображает движение активного ила и подачу воздуха.

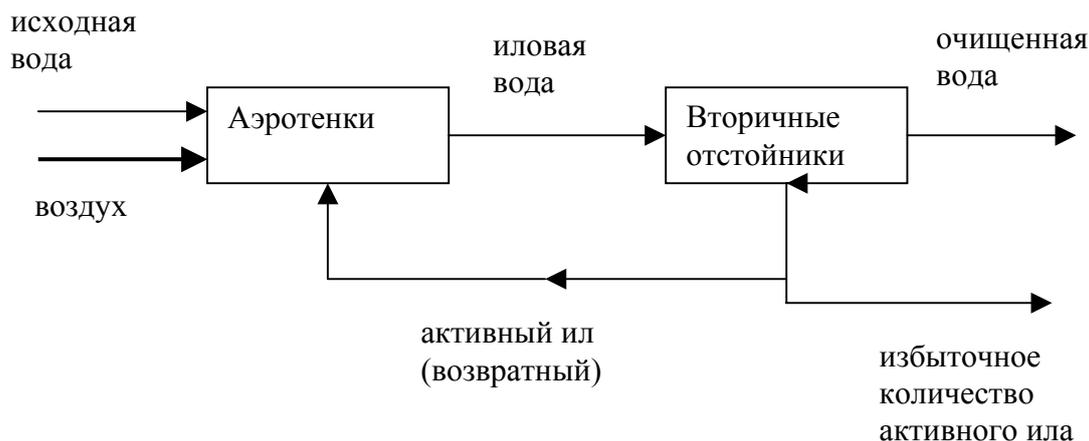


Рисунок 1 — Схема очистки сточных вод

Подача сжатого воздуха в аэротенки осуществляется от компрессорной станции магистральным воздухопроводом, и распределяется по секциям аэротенка разводными воздухопроводами и стояками.

Очищенная вода должна соответствовать экологическим нормам, поэтому качество очистки сточных вод периодически контролируется. Оценку работы очистных сооружений проводят по следующим основным показателям: бихроматное потребление кислорода, биохимическое потребление кислорода, иловый индекс, зольность.

Процесс очистки сточных вод является подверженным некоторым возмущающим воздействиям в основном из-за повышенной чувствительности микроорганизмам к факторам окружающей среды. На эффективность и интенсивность биохимической очистки оказывают влияние такие факторы как температура, рН, наличие токсичных веществ, концентрация биомассы ила, а также степень перемешивания, доза и возраст ила.

Рассмотрим, как изменяется потребление растворенного кислорода в аэротенках от изменения других факторов. Концентрация кислорода при любых обстоятельствах не должна опускаться ниже минимального значения 2 мг/л.

Влияние температуры сточных вод на концентрацию кислорода в аэротенках осуществляется из-за изменения активности жизнедеятельности микроорганизмов. Повышение температура за пределы физиологической нормы приводит к гибели микроорганизмов, в то время как понижение температуры вызывает лишь снижение активности микроорганизмов, а следовательно к меньшему потреблению кислорода и ухудшению качества очистки. Резкие колебания температуры сточных вод в течение суток вызывают снижение активности микроорганизмов и требуют адаптации к изменившимся условиям. Постепенное изменение температур воды в относительно больших интервалах не опасно для микроорганизмов, которые способны адаптироваться к новым условиям. Вместе с тем, внезапное изменение температуры воды даже в пределах 10–15 °С способно вызывать массовое отмирание микроорганизмов. В условиях низких температур вязкость воды значительно увеличивается. В зимний период, когда мощность биологического окисления снижается, аэротенкам необходимо работать с более высокой дозой ила. Оптимальной температурой иловой смеси считаются температуры 15–25 °С. Недопустимо снижение температуры ниже 5 °С.

Бактерии лучше растут в нейтральной или слабощелочной среде. Эффективная очистка сточных вод происходит при рН = 5,5...8,5, а оптимальная при рН = 6,5...7,5.

Внезапные токсичные сбросы в сточных водах приводят к нарушению процесса биологического окисления загрязняющих веществ, что в совокупности приводит к возрастанию кислородопоглощаемости ила и нарушает процесс отстаивания во вторичных отстойниках. При возрастании поступления загрязняющих веществ со сточной водой для удовлетвори-

тельной очистки необходимо увеличивать концентрацию ила, но следует также учесть, что при увеличении концентрации взвешенных веществ в сточных водах количество ила в аэротенках увеличивается за счет их жизнедеятельности (из-за увеличения питательных веществ). Из-за увеличения концентрации ила соответственно увеличивается количество потребляемого кислорода. При уменьшении поступления загрязняющих веществ соответственно требуется меньше ила и меньше кислорода.

Микроорганизмы потребляют кислород в процессе жизнедеятельности, поэтому потребление кислорода непосредственно зависит от количества ила. Скорость потребления кислорода клетками активного ила в нормальных условиях составляет от 12 до 20 мг кислорода в час на 1г сухого вещества ила. Нагрузка на ил в пределах аэротенка меняется, а, следовательно, меняются и условия оптимизации процесса и, в частности, условия кислородоснабжения ила. Гибко менять интенсивность аэрации по длине аэротенка технически сложно, поэтому на начальных участках коридоров возникает дефицит кислорода, а на конечных — его избыток.

Система автоматического управления компрессорами должна обеспечивать необходимое количество сжатого воздуха, который подается от компрессорной станции в аэротенки, для нормального протекания процесса очистки сточной воды. Состояние процесса очистки воды изменяется от нескольких факторов, которые были рассмотрены выше. Чтобы не было перерасхода электроэнергии необходимо регулировать производительность компрессоров в зависимости от состояния процесса очистки сточной воды в аэротенках.

Существует несколько способов регулирования центробежных компрессоров: изменение числа оборотов, дросселирование потока воздуха во всасывающем трубопроводе, дросселирование потока воздуха в нагнетательном трубопроводе, частичный выпуск нагнетаемого воздуха в атмосферу, изменение положения поворотных лопаток диффузора, изменение положения поворотных лопаток при входе воздуха в рабочие колеса. Наиболее рациональным способом является регулирования числа оборотов центробежных компрессоров.

На Донецких очистных сооружениях компрессоры приводятся в действие асинхронными электродвигателями. Компрессорная установка состоит из асинхронного электродвигателя, повышающего редуктора, центробежного компрессора. Асинхронный двигатель работает в длительном режиме. Регулирование производительности компрессорами предполагает непрерывное управление приводным двигателем компрессорной установки в соответствии с изменениями расхода в воздухопроводе и концентрации кислорода в аэротенках.

Для регулирования скорости асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором применяют преобразователи частоты. Основное назначение преобразователя частоты — это получение переменного по частоте и амплитуде напряжения для управления трехфазным асинхронным двигателем.

На преобразователь частоты нужно подавать управляющий сигнал, который будет задавать режим работы электродвигателя и компрессора. Управляющий сигнал должен учитывать изменения в технологическом процессе очистки сточных вод. Для этого необходимо владеть информацией о процессах протекающих в аэротенках (температура воды, pH среды, концентрация кислорода и токсичных примесей в воде) на основании которой можно судить о необходимом количестве подаваемого воздуха, т.е. о необходимой нагрузке на компрессоры.

Для данной системы необходимы измерительные устройства температуры, pH сточной воды, концентрации кислорода в аэротенках, токсичных примесей в воде, количества ила, расхода воздуха у аэротенка и от компрессоров. Процесс очистки в каждом аэротенке идентичен, но тем не менее в каждом аэротенке он протекает специфически. Поэтому необходимо устанавливать измерительные устройства в каждом аэротенке. Возникает необходимость обрабатывать большой поток данных, поэтому сбор информации от измерительных устройств является ответственной задачей. Учитывая большую территориальную распределенность измерительных устройств одного аэротенка от другого, а также большое расстояние до компрессорной станции, информационную сеть эффективно реализовывать на основе беспроводной передачи.

Радиопередача данных может быть организована на протоколе обмена данными ZigBee. ZigBee является наиболее молодой и перспективной технологией для построения беспроводных сетей с большими объемами передаваемой информации. Протокол имеет высокую надежность передачи данных, которая осуществляется с малыми временными задержками. Протокол ZigBee изначально разрабатывался для объединения в сеть большого количества автономных устройств. Приемопередатчики имеют малое энергопотребление и отличаются высокой степенью интегрирования, что позволяет создавать малогабаритные устройства, основанные на двух микросхемах и небольшим числом навесных элементов. В каждом из датчиков будет установлен приемопередатчик для обмена данными с диспетчерской. В диспетчерской находится устройство сбора данных, которое периодически опрашивает датчики для получения с них информации. Также проводится обработка полученных данных, отображение их диспетчерскому персоналу и архивирование для долгосрочного анализа.

На основе данных от измерительных устройств, мы можем судить о необходимом количестве сжатого воздуха, который нужно подать как в магистральный воздухопровод, так и в конкретный азротенок. В ответвлении от магистрального воздухопровода к азротенку имеется задвижка, управляя приводом которой можно изменять подачу воздуха в азротенок. Общее количество необходимого воздуха для азротенок является нагрузкой компрессорной станции.

Как правило, на компрессорных станциях используются не одна, а несколько компрессорных установок. Создание общей системы управления компрессорами позволяет координировать и комбинировать работу компрессоров (которые могут быть разной производительности), распределять время работы.

Таким образом, система управления компрессорами должна состоять из устройства сбора данных, устройства управления, преобразователей частоты для каждого электродвигателя компрессорной установки. Структурная схема системы управления компрессорами приведена на рис.2.

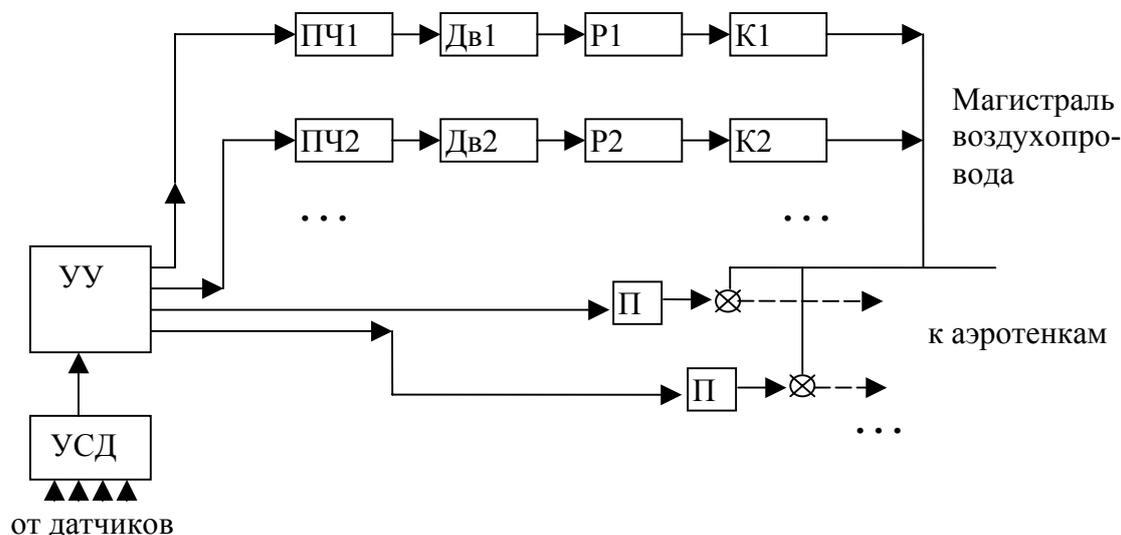


Рисунок 2 — Структурная схема системы управления компрессорами

Где ПЧ — преобразователь частоты, Дв — двигатель, Р — редуктор, К — компрессор, УУ — устройство управления, УСД — устройство сбора данных, П — привод задвижки.

Рассмотрим компрессорную установку как объект автоматического управления. При частотном управлении асинхронный электродвигатель рассматривается с механической и электромагнитной точки зрения. Это позволяет оценивать помимо частоты вращения ротора еще и механический момент. Такое разделение электродвигателя при математическом описании позволяет учитывать момент сопротивления, действующий со стороны нагрузки на валу ротора. На рис.3 приведена структурная схема асинхронного электродвигателя согласно математическому описанию электродвигателя приведенного в [1].

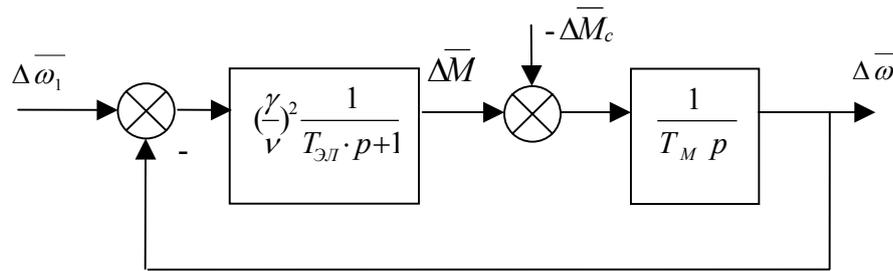


Рисунок 3 — Структурная схема асинхронного электродвигателя при управлении частотой питающего напряжения

Компрессор характеризуется газодинамическими характеристиками (зависимость давления от расхода). Если взять какую либо точку на статической характеристике нагнетателя, то можно проследить ее траекторию движения при изменении частоты вращения компрессора.

Согласно правилу подобия, рассмотренного в [2], между рабочими точками при различной частоте вращения существуют зависимости вида:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

где Q, P, N — расход, давление и потребляемая мощность компрессора, n — частота вращения. Газодинамические характеристики компрессора позволяют в рабочей области расхода задать соответствующие им передаточные функции:

$$W_Q(p) = k_Q, \quad W_P(p) = k_p.$$

Математическое моделирование в пакете Matlab Simulink показало, что в разомкнутом контуре присутствует статическая ошибка, которая влияет на работу двигателя и вызвана моментом сопротивления компрессора.

Рассмотрим замкнутую систему по расходу воздуха. В замкнутой системе при помощи регулятора должно формироваться управляющее воздействие от преобразователя частоты f, значение которого зависит от уставки Q. При помощи пропорционально-интегрального регулятора получилось убрать статическую ошибку. Но результат моделирования показал, что применение пропорционально-интегрального регулятора не допустимо из-за большого значения f в начальный момент времени переходного процесса (рис.4). Это является недопустимым, так как приведет к значительным перегрузкам электродвигателя и к его «прокидыванию».

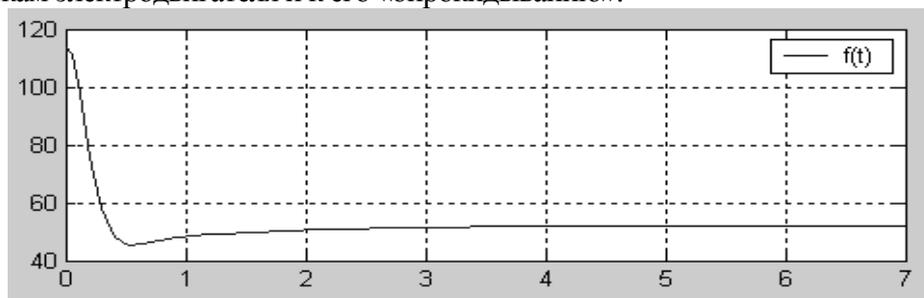


Рисунок 4 — Изменение управляющего воздействия f во времени при уставке Q=750 м³/мин и применении ПИ-регулятора

Выбор интегрального регулятора показал отсутствие недостатка пропорционально-интегрального регулятора (рис.5). Передаточная функция интегрального регулятора соответствует:

$$W(p) = \frac{K_i}{p}$$

При  $K_i=0.45$  получилось избавиться от перерегулирования при наименьшем времени переходного процесса. Переходной процесс установления расхода на выходе компрессора приведен на рис.6.

Математическое моделирование показало возможность управления компрессорами и достижения необходимого значения расхода воздуха на выходе из компрессора.

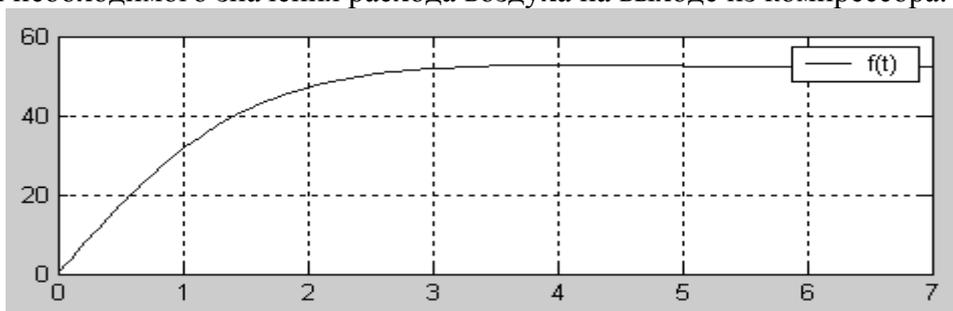


Рисунок 5 — Изменение управляющего воздействия  $f$  во времени при уставке  $Q=750 \text{ м}^3/\text{мин}$  и применении И-регулятора

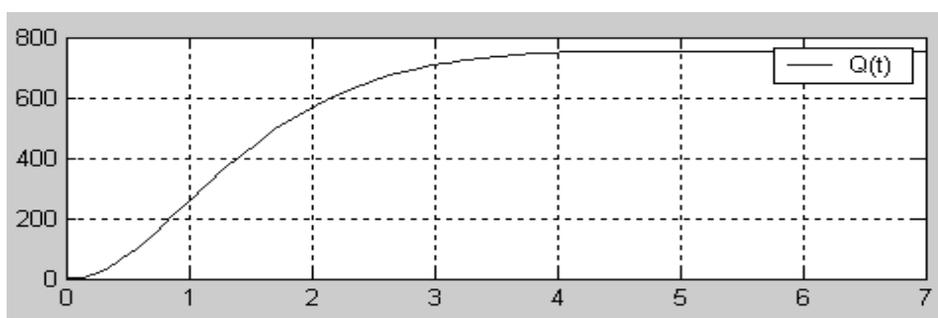


Рисунок 6 — Изменение расхода во времени при уставке  $Q=750 \text{ м}^3/\text{мин}$  и применении И-регулятора

**Выводы.** В работе были детально рассмотрены все последовательные этапы технологического процесса очистки сточных вод. Было выявлено, что наибольший интерес для построения системы автоматического управления компрессорами представляет этап очистки воды в аэротенках. Установлено влияние основных возмущающих факторов на аэротенок и воздействия для их компенсации. Перечислены основные способы регулирования центробежных компрессоров, наиболее гибким из которых является метод регулирования числа оборотов компрессора. На основе метода частотного управления электродвигателя была составлена структурная схема системы управления компрессорами. Для сбора информации от измерительных устройств была предложена беспроводная система передачи данных по протоколу ZigBee. Рассмотренная система позволяет оперативно формировать управляющие воздействия, и таким образом четко соответствовать изменениям технологического процесса очистки сточных вод. При помощи математической модели компрессорной установки продемонстрировано возможность гибкого регулирования производительности компрессора. Непрерывное регулирование производительности компрессоров не допустит излишнего перерасхода электроэнергии.

### Литература

1. Башарин А.В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. — Л: Энергоиздат, 1982. — 357 с.
2. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебное пособие для вузов. — М: Энергоатомиздат, 1984. — 316 с.
3. Штерн Л.Я. Регулирование и автоматизация воздуходушных и компрессорных станций: Учебное пособие для вузов. — М: Metallurgizdat., 1963. — 378 с.

Здано в редакцію:  
26.02.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Чичикало Н.І.