

## УПРАВЛЕНИЕ ДОЗОЙ ОЗОНА И ЕГО КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ ВОДОПОДГОТОВКИ

### OZONE DOSE AND CONCENTRATION CONTROL DURING WATER TREATMENT

*E. Korsa-Vavilova*  
*E. Naumenko*  
*V. Gibalov*  
*V. Bozhko*  
*A. Shmelev*

*Summary:* The problem of obtaining water of a given quality is becoming more and more urgent every year and, unfortunately, a difficult task to solve, in view of the constantly changing «pollutants». The environmental situation creates new requirements for the technological filling of water treatment plants all the time. An important stage in the creation of the hardware design of the water treatment process is the prediction of the control system for this process in the future, and as a consequence, the formulation of algorithms for maintaining the operating modes of technological processes, because the continuous change in water flow, the multiplicity of contact pools and their remoteness create a lag effect and the impossibility of maintaining a given concentration by «conventional» («classical») control algorithms. The proposed control system, operating according to a fuzzy algorithm, made it possible to reduce the individual characteristics, non-linearly related to each other, of several dozens of discharge assemblies of ozone generation modules to maintain the nominal concentration of ozone with satisfactory accuracy.

*Keywords:* fuzzy algorithm, water treatment, contact pools, ozone generation module, hardware design.

**Корса-Вавилова Елена Викторовна**

генеральный директор,  
ООО «Московские озонаторы», Россия, Москва,  
korsa\_elena@mail.ru

**Науменко Эльвира Вячеславовна**

доцент, Российский Технологический Университет —  
Московский Институт Радиоэлектроники  
и Автоматики, Россия, Москва,  
Elvira.naumenko@yandex.ru

**Гибалов Валентин Иванович**

заместитель генерального директора, профессор,  
ООО «Московские озонаторы», Россия, Москва,  
gibalov@medozone.ru

**Божко Виктор Иванович**

доцент, Российский Технологический Университет —  
Московский Институт Радиоэлектроники  
и Автоматики, Россия, Москва,  
stud2010@rambler.ru

**Шмелев Алексей Ярославович**

главный конструктор,  
ООО «Московские озонаторы», Россия, Москва  
shmelev.ay@mozo.ru

*Аннотация:* Проблема получения воды заданного качества с каждым годом становится все более актуальной и к сожалению, трудно решаемой задачей, в виду непрерывно меняющихся «загрязнителей». Экологическая ситуация создает все время новые требования к технологическому наполнению станций водоподготовки. Важным этапом в создании аппаратного оформления процесса водоподготовки является прогнозирование системы управления процессом синтеза озона в дальнейшем, и как следствие, формулирование алгоритмов поддержания рабочих режимов технологических процессов синтеза озона, т.к. непрерывное изменение расхода воды, множественность контактных бассейнов и их удаленность создают эффект запаздывания и невозможность поддержания заданной концентрации «обычными» («классическими») алгоритмами управления. Предложенная система управления, работающая по нечеткому алгоритму, позволила свести индивидуальные характеристики, нелинейно связанные между собой, нескольких десятков разрядных сборок модулей генерации озона к удержанию номинальной концентрации озона с удовлетворительной точностью.

*Ключевые слова:* нечеткий алгоритм, водоподготовка, контактные бассейны, модуль генерации озона, аппаратное оформление.

Для более качественного управления концентрацией озона был выбран алгоритм нечеткого управления, основанный на нечеткой логике. Указанный алгоритм используется для принятия решений в расплывчатых условиях (оригинальные, не относящиеся к вероятностным, неопределенности), которые Р. Белманн и Л. Заде описали в своей статье [1]. Эти неопределенности были названы нечеткими. Применение нечетких моделей в течении более 30 лет, позволили отработать алгоритмы, которые обладают не только линг-

вистической информацией (правилами) от экспертов, но и могут адаптироваться, используя численные данные (пары входных, выходных значений) для достижения наилучших характеристик управления. В процессе решения перечисленных выше задач, указанный алгоритм позволил при наличии нечетких знаний об объекте регулирования, связанных прежде всего с запаздыванием между управляющим воздействием (изменение производительности генераторов озона) и изменением значения целевого параметра — дозы озонирования,

получить более качественное регулирование концентрацией озона в контактных бассейнах, что обеспечило более высокое качество воды.

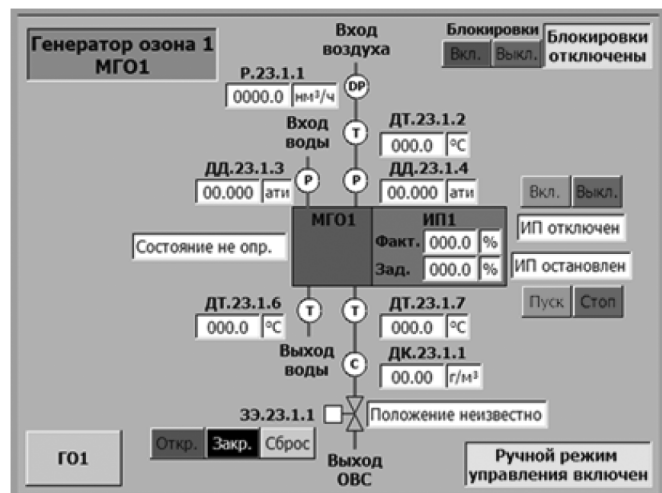


Рис. 1. Структура и мнемосхема одного модуля озонирования генератора озона ОУ-25 с источником питания

Результаты применения алгоритма нечеткой логики для поддержания дозы озона в непрерывно изменяющемся расходе воды в каждом бассейне были опубликованы ранее [2].

Данный алгоритм управления был реализован на двух станциях водоподготовки, Рублевской и Западной, г. Москва. При работе этого алгоритма расход озono-воздушной смеси также непрерывно изменялся и поддержание установленной концентрации озона было сложной задачей. Источником озона на указанных станциях были озонаторы, типа ОУ-25, производительностью 25 кг озона в час: На Западной станции было установлено 3 генератора, на Рублевской — 4. Условно, каждый генератор состоял из 16 отдельных озонаторов, каждый из которых управлялся независимо. Структура и информационный массив каждого из озонаторов понятен из Рисунка 1, на котором приведена мнемосхема отдельного модуля озонирования, являющейся одним из «экранов» системы управления блоком озонсорбции. Переменный расход воздуха в тракте озono-воздушной смеси приводил к необходимости ввода или вывода в работу указанных «единичных» озонаторов для обеспечения требуемой производительности системы по озону и регулировки производительности каждого из них. Максимально в системе управления могло находиться 64 озонатора.

Функциональная связь производительности отдельного озонатора с вводимой в озонатор мощностью, во-первых, была индивидуальна для каждого из них и нелинейна — Рисунок 2. Максимальная энергетическая эффективность синтеза озона при такой характеристике

достигается при минимальной его концентрации. Более того, рост вложенной энергии увеличивает выход озона до определенной величины, а далее концентрация озона падает вплоть до нуля. Все перечисленное дает предпосылку для постановки и решения задачи управления концентрацией озона.

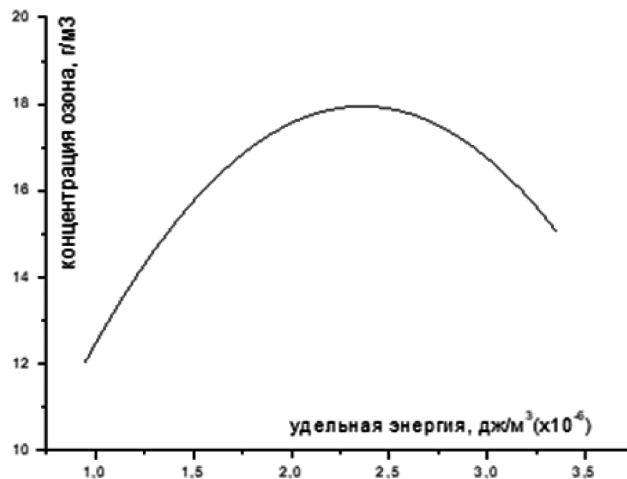


Рис. 2. Типичная «кинетическая» озонатора ОУ-25

Свойства нечетких моделей использовать экспертную лингвистическую информацию и адаптироваться, используя численные данные, к реальной ситуации для достижения наилучших характеристик, а так же их преимущества над нейронными сетями, которые не могут нести лингвистическую информацию непосредственно стали предпосылкой для создания системы управления на их основе [3].

Нечеткие экспертные системы учитывают неопределенность, дают возможность моделировать рассуждения на основе здравого смысла, что весьма сложно сделать с помощью обычных систем. Таким образом, основной целью введения нечеткой логики является создание аппарата, способного моделировать человеческие рассуждения и применять человеческие приемы принятия решений в ходе решения различных задач. Лингвистические переменные, используемые в теории нечетких множеств, также как обычные переменные могут принимать различные лингвистические значения [4]. Однако, в случае технической реализации в качестве входных и выходных сигналов выступают измеряемые величины, которые однозначно сопоставляют входным значениям соответствующие выходные значения. Для обеспечения взаимодействия множеств этих двух видов вводится нечеткая система с так называемыми фаззификатором (преобразователем множества входных данных в нечеткое множество) на входе и дефаззификатором (преобразователем нечетких множеств в конкретное значение выходной переменной) на выходе [5]. Существует достаточное количество промышленных объектов, характеризующихся существенной нелинейностью, и, зачастую, отсутствием приемлемой

аналитически заданной модели. Если некоторые процессы объекта управления плохо поддаются формализации и математическому описанию, то в существующей системе управления используют регулятор нечеткой логики параллельно традиционному регулятору, т.е. нечеткая логика используется для замены традиционных алгоритмов управления и совместно с ними. Экспериментально показано, что нечеткое управление дает лучшие результаты, по сравнению с результатами, получаемыми при классических алгоритмах управления. Очевидной областью внедрения алгоритмов нечеткой логики являются всевозможные экспертные системы, в том числе, нелинейный контроль и управление в производстве [6].

Для получения математической модели алгоритма нечеткого управления концентрацией озона в системе синтеза озона вводились базовые терм-множества входных и выходных лингвистических переменных, и использовалась система нечеткого вывода на основе нечетких лингвистических высказываний в форме « $\beta_i$  есть  $\tau_{T_j}$ ». Соответственно, база правил управления концентрацией озона в каждом модуле озонирования записывается в виде многомерной матрицы  $\|L_{iklr}\|$ .

Под концентрацией озона понималось весовое количество озона в единице «нормального» объема воздуха. Алгоритм управления концентрацией озона мог находиться в двух состояниях:

- алгоритм нечеткого управления — поддержание требуемой концентрации;
- алгоритм аварийного состояния. Последний включался при достижении системой синтеза озона предельно допустимой производительности по озону, когда для поддержания дозы озона требовалась производительность СИСТЕМА СИНТЕЗА ОЗОНА выше существующих возможностей.

Ситуация с превышением предельно допустимой производительности по озону выше технических возможностей СИСТЕМА СИНТЕЗА ОЗОНА возникала при недостаточной производительности по озону системы синтеза озона. Например, в случае выведения генераторов озона на регламентное обслуживание производительность СИСТЕМА СИНТЕЗА ОЗОНА уменьшалась, и концентрация озона в газовом тракте при достаточно большом расходе озono-воздушной смеси снижалась. В этом случае поддержание номинальной концентрации озона в озono-воздушной смеси становилось невозможным, и система устанавливала концентрацию озона, которая получалась. Как правило, указанный режим — аварийный, возникал крайне редко и основным режимом работы системы синтеза озона был режим поддержания концентрации озона, то есть реализовывался созданный алгоритмом нечеткого управления концентрацией озона на основе классического принципа управления по отклонению и методов нечеткого управления.

Номинальная концентрация озона в потоке воздуха устанавливалась при пусковых или регламентных работах в соответствии с актуальным состоянием оборудования блока озонирования. Входные переменные — расход воздуха ( $q_i$ ) в  $i$ -ом модуле озонирования, измерялись непрерывно. Полный расход воздуха  $Q_i$  через систему синтеза озона определялся как сумма расходов через работающие модули

$$Q_i = \sum g_i, \quad (1)$$

где  $g_i$  — расход воздуха ( $q_i$ ) в  $i$ -ом модуле озонирования.

Помимо номинальной концентрации озона устанавливалась номинальная производительность модуля озонирования  $P$ , которая определялась при пусковых или регламентных работах в соответствии с актуальным состоянием оборудования блока озонирования.

Текущая концентрация озона на выходе из каждого модуля озонирования измерялась непрерывно. Производительность каждого модуля рассчитывалась в соответствии с

$$P_i = c_i \cdot q_i \quad (2)$$

где  $c_i$  — текущая концентрация озона на выходе из  $i$  модуля озонирования

А общая производительность системы синтеза озона «по озону» находилась как сумма производительностей каждого модуля

$$P^0 = \sum p_i. \quad (3)$$

Кроме того, требуемая общая производительность ( $P$ ) определялась как произведение общего расхода воды во всех работающих бассейнов на установленную дозу озона. Последняя величина определяет нужное количество модулей озонирования, которые необходимо ввести в работу, « $n$ ».

$$n = \frac{P}{p} + 1. \quad (4)$$

При очередном включении системы с новым заданием, ожидаемый общий расход воды вводится оператором. По введенной величине расхода воды и дозе озонирования определяется требуемое количество работающих модулей озонирования в соответствии с (4). При работающем блоке озонирования, изменение расхода воды приводит к изменению расхода озono-воздушной смеси. Алгоритм управления системой синтеза озона для поддержания номинальной концентрации озона управляет мощностью источников питания всех введенных в работу модулей озонирования. При достижении границ зоны регулирования мощности ис-

точников питания, как нижней, так и верхней, АСУ системы синтеза озона проводит операцию введения или выведения в/из работы определенного числа модулей озонирования. Такая ситуация предусматривалась алгоритмом управления и производилась автоматически системой управления.

Поддержание концентрации озона в озono-воздушная смесь является вторым из двух основных технологических стадий процесса озонирования питьевой воды на станциях водоподготовки. Этот технологический процесс относится к сложным многосвязным системам и основан на следующем представлении об его алгоритме:

1. Поддержание концентрации озона в озono-воздушной смеси связано с управлением электрической мощностью модулей генерации озона, которое, в свою очередь, основывается на измерении следующих параметров, связанных с каждым модулем: расход воздуха и воды, температур воды и воздуха на входе и выходе из модуля, концентрации озона, регулирование электрической мощности источников.
2. Для эффективного проведения процесса необходимо обеспечивать требуемую производительность суммарно по всем работающим модулям путем ступенчато-непрерывного управления количеством модулей и их общей электрической мощностью.

Потоки параметрической и управляющей информации, относящихся к каждому модулю генерации озона и всем генераторам озона ОУ-25 в целом по станции приведены на Рисунках 1 и 2.

Необходимо отметить, что каждый модуль генерации озона содержал 4 сборки по 15 штук электродов. Электропитание каждой сборки осуществлялось отдельным источником питания. То есть один МГО включал в свой состав 4 источника питания.

В общем виде математическая модель процесса поддержания концентрации озона представляла собой систему линейных дифференциальных уравнений, которая связывала вектор параметров состояний с вектором управляющих воздействий и вектором возмущающих воздействий. Кроме того, математическая модель включала также линейные уравнения, которые связывали вектор выходных (наблюдаемых) переменных с вектором параметров состояний и вектором возмущающих воздействий.

Так как каждый модуль генерации озона являлся независимым объектом управления (за исключением того, что модуля собирались по 4 штуки в генератор озона ОУ-25 с объединенными водяными и воздушными коллекторами), то математические модели создавались

для модуля и были независимые друг от друга. Система управления синтезом озона объединяла все модули и генераторы озона в единую систему.

Автоматизированная система управления синтезом озона, помимо главной функциональной цели этой системы — поддержание номинальной концентрации озона в потоке озono-воздушной смеси, обеспечивала рутинные операции: управление газовой и водяной арматурой на соответствующих коллекторах, съем параметров «вне» функционально предназначенности, обмен данными с диспетчерским уровнем и уровнем местных постов управления бассейнов, обслуживание системы озонобезопасности и т.д. Поле параметров локальной систему управления синтезом озона насчитывала более двух тысяч тэгов. Но для реализации нечеткого алгоритма управление требовалось меньше данных. Все пространство переменных, необходимых для функционирования нечеткого алгоритма управления для каждого бассейна, было разбито на несколько векторов:

**Вектор параметров состояний**,  $x(P_{j1}, F_j, c, T_{j1}, C_j)$ , компонентами которого являлись следующие параметры:

- $P_{j1}$  — давление воздуха на входе в  $j$ -ый модуль;
- $F_j$  — расход воздуха на входе в  $j$ -ый модуль;
- $c$  — номинальная концентрация озона;
- $T_{j1}$  — температура воздуха на входе в  $j$ -ый модуль;
- $C_j$  — концентрация озона на выходе из  $j$ -ого модуля;

Размерность вектора параметров состояния  $5 \times 1$ .

**Вектор управляющих воздействий**,  $u(t_j^i)$ , компонентами которого являлись следующие параметры:

$t_j^i$  — электрическая мощность источника питания: « $i$ -ой» сборки электродов в  $j$ -ом модуле озонирования.

**Вектор выходных (наблюдаемых) переменных**,  $y(P_{j2}, T_{j2}, T_{j3}, T_{j4})$ , компонентами которого являлись следующие параметры:

- $P_{j2}$  — давление воды в контуре охлаждения на входе в  $j$ -ый модуль;
- $T_{j2}$  — температура ОЗОНО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ на выходе из  $j$ -ого модуля;
- $T_{j3}$  — температура воды на входе в  $j$ -ый модуль;
- $T_{j4}$  — температура воды на выходе из  $j$ -ого модуля;

Размерность вектора наблюдаемых переменных  $4 \times 1$ .

Указанные вектора состояний и управляющих воздействий связаны между собой системой дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Gr(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (5)$$

Где матрицы  $A [5 \times 5]$ ,  $B [5 \times 4]$ ,  $G [5, 4]$ ,  $C [4 \times 5]$ ,  $D [4 \times 4]$ , которые определяются на основе параметров математической модели процесса поддержания номинальной концентрации озона в потоке озono-воздушной смеси для каждого модуля, записанной в физических переменных вход-выход.

Актуальные и номинальные значения входных переменных устанавливались на основе технологического регламента, технических условий работы оборудования системы синтеза озона и оператором:

- актуальная величина давления  $P_{j1}$  на входе в модуль непрерывно измеряется.
- актуальная величина температуры воздуха —  $T_{j1}$  на входе в модуль непрерывно измеряется.
- актуальная величина расхода воздуха на входе в модуль —  $F_j$  на входе в бассейн непрерывно рассчитывается в соответствии с соотношениями 6.
- номинальная концентрация озона определяется состоянием оборудования и устанавливается при проведении регламентных работ и по указанию;
- актуальная концентрация озона на выходе из модуля  $C_j$  непрерывно измеряется;
- актуальная величина  $T_{j2}$  — температура озono-воздушной смеси на выходе из  $j$ -ого модуля непрерывно измеряется;
- актуальная величина  $T_{j3}$  — температура воды на входе в  $j$ -ый модуль непрерывно измеряется;
- актуальная величина  $T_{j4}$  — температура воды на выходе из  $j$ -ого модуля непрерывно измеряется;
- актуальная величина —  $P_{j2}$  — давление воды в контуре охлаждения на входе в  $j$ -ый модуль непрерывно измеряется;

Математическая модель (5), создавалась для каждого модуля и аддитивно дополнялись для всех работающих модулей. Формирование матриц в математической модели (5) требовало проведения экспериментов и соответствующих алгоритмов для идентификации параметров модели в реальных условиях, при работающей системе синтеза озона. Это невозможно сделать в полном объеме с приемлемой точностью, описать все протекающие процессы и идентифицировать законы управления и их параметры для соответствующей системы управления с заданной точностью в реальном времени. По этой причине были применены новые интеллектуальные методы управления, основанные на нечеткой логике и искусственных нейросистемах [6]. Синтез этих управляющих алгоритмов, в том числе, алгоритм нечеткого управления, был применен для обеспечения максимальной эффективности работы системы синтеза озона

на для поддержания номинальной концентрации озона в потоке озono-воздушной смеси.

Идея алгоритма нечеткого управления заключается в том, что поле численных параметров, с которыми работает локальная автоматическая система синтеза озона, делится на некоторые группы, в которых отклонение параметров от номинальных значений можно характеризовать словами: близко к номиналу, больше номинала и т.д. То есть, для синтеза алгоритма нечеткого управления процессом поддержания концентрации озона в тракте озono-воздушной смеси вводились входные лингвистические переменные  $\beta_{Xi}^j$ , характеризующие состояние процесса, и выходные  $\beta_{Uj}^j$ , являющиеся управляющими воздействиями.

Входные лингвистические переменные  $\beta_{Xi}^j$ , характеризующие состояние процесса, и выходные  $\beta_{Uj}^j$ , являющиеся управляющими воздействиями.

Входные лингвистические переменные

$$\beta_{Xi}^j = \{P_{j1}, F_j, c, T_{j1}, C_j\}. \quad (6)$$

Выходные лингвистические переменные

$$\beta_{Uj}^j = \{t_j^j\}. \quad (7)$$

Входные лингвистические переменные имеют по пять базовых терм-множеств,  $T_x$  на множестве параметров состояний  $\{X\}$  или:

- «значительно ниже номинального значения» —  $N_{x \min}$
- «ниже номинального значения» —  $N_x$
- «номинальное значение» —  $Z_x$
- «выше номинального значения» —  $P_x$
- «значительно выше номинального значения» —  $P_{x \max}$

$$T_x = \{N_{x \min}, N_x, Z_x, P_x, P_{x \max}\}. \quad (8)$$

Выходные лингвистические переменные также имеют пять базовых терм-множеств  $T_u$  на множестве управляющих воздействий  $\{U\}$  или

- «уменьшить значительно»,  $N_{u \min}$
- «уменьшить»,  $N_u$
- «не изменять»,  $Z_u$
- «увеличить»,  $P_u$
- «увеличить значительно»  $P_{u \max}$

$$T_u = \{N_{u \min}, N_u, Z_u, P_u, P_{u \max}\}. \quad (9)$$

Для определения значения термина  $T_x$ , на множестве параметров состояний вводится функция принадлежности  $\mu_{X(U)}$ , которая градуирует принадлежность того

или иного параметра состояний пяти базовым элемен-там терм-множеств,  $T_x$ . Градации параметров состояний по термам (9), то есть определение функции принадлеж-ности  $\mu_{x(U)}$ , выбирались на основании экспертных оценок и уточнялись в процессе работы программы.

Логика работы алгоритма нечеткого управления под-разумевает формулирование связи между лингвисти-ческими значениями термов параметров состояний  $T_x$  и лингвистическими значениями выходных термов  $T_u$  на множестве управляющих воздействий  $\{U\}$ . Этот про-цесс называется «система нечеткого вывода (СНВ)» и, строго, строится на основе лингвистических высказыва-ний в форме « $\beta_i$  есть  $\tau_{T_j}$ », где  $\beta_i \in \beta_{X_i}^j \cup \beta_{U_j}^i$ ,  $\tau_{T_j} \in T_x \cup T_u$  и содержит правила нечетких продукций, которые мож-но представить в следующем обобщенном виде [3]:

ЕСЛИ « $\beta_{X_1}^j$  есть  $\tau_{T_{X_1}}$ » ОП ... ОП « $\beta_{X_7}^j$  есть  $\tau_{T_{X_5}}$ »  
ТО « $\beta_{U_1}^j$  есть  $\tau_{T_{U_1}}$ » ОП « $\beta_{U_2}^j$  есть  $\tau_{T_{U_2}}$ » ОП « $\beta_{U_3}^j$  есть  $\tau_{T_{U_5}}$ » (10)

где ОП — некоторая из бинарных операций нечеткой конъюнкции «И» (« $\wedge$ ») или нечеткой дизъюнкции «ИЛИ» (« $\vee$ »);  $\tau_{T_j}$  — отдельный терм лингвистической переменной  $\beta_i$ . Другими словами, каждому терму параметров состояний  $T_x$  («значительно ниже номинального значения» —  $N_{x \min}$ , «ниже номинального значения» —  $N_x$ , «номинальное значение» —  $Z_x$ , «выше номинального значения» —  $P_x$ , «значительно выше номинального значения» —  $P_{x \max}$ ) ставился соответствующий терм на мно-жестве управляющих воздействий  $T_u$  («уменьшить зна-чительно», «уменьшить», «не изменять», «увеличить», «увеличить значительно»).

Таблица 1.

База правил управления концентрацией озона  $C_j$  в  $j$ -ом модуле озонирования

|              | $Z_j^1$      | $Z_j^2$      | $Z_j^3$      | $Z_j^4$      |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $N_{x \min}$ | $P_{u \max}$ | $P_{u \max}$ | $P_{u \max}$ | $P_{u \max}$ |
| $N_{df}$     | $P_u$        | $P_u$        | $P_u$        | $P_u$        |
| $Z_{df}$     | $Z_u$        | $Z_u$        | $Z_u$        | $Z_u$        |
| $P_{df}$     | $N_u$        | $N_u$        | $N_u$        | $N_u$        |
| $P_{x \max}$ | $N_{u \min}$ | $N_{u \min}$ | $N_{u \min}$ | $N_{u \min}$ |

В общем случае базу правил управления работой  $j$ -го модуля генерации озона представлялась в виде матрицы  $\|L_{klr}\|$  размерности  $5 \times 5 \times 4$  [4], где  $k$  — количество (число) входных лингвистических переменных,  $l$  — количество базовых терм-множеств входной лингвистической переменной,  $r$  — количество выходных лингвистических переменных. Соответственно база правил управления всей СИСТЕМА СИНТЕЗА ОЗОНА является простой суммой матриц  $\|L_{klr}\|$ , то есть для Рублевской водопроводной станции, на которой установлено 4 генератора озона, в каждом из которых 4 модуля генерации это сумма из 16 указанных матриц.

Например, база правил управления концентрацией озона  $C_j$  в  $j$ -ом модуле озонирования, которая определя-ется на основе данных, полученных во время пуско-на-ладочных работ — типа кривой, приведенной на Рису-нке 2, представляется в виде матрицы размерности  $5 \times 4$ , элементами которой являются терм-множества  $T_u$  — Таблица 1.

На Рисунках 3, 4 представлены созданные для За-падной станции водоподготовки АО «Мосводоканал» г. Москвы (проектировщик ООО «Москозоно-воздушная смеськие озонаторы») мнемосхемы управления участ-ком синтеза озона. Штатным режимом работы указан-ной системы является автоматический. По этой причине состояние агрегатов и параметрическая информация, представленная на этих мнемосхемах, является инфор-мационным материалом, на основании которой дис-петчер всей станции водоподготовки может в деталях отследить работу узла озона-сорбции, в том числе, под-держание номинальной концентрации озона в потоке озона-воздушной смеси.

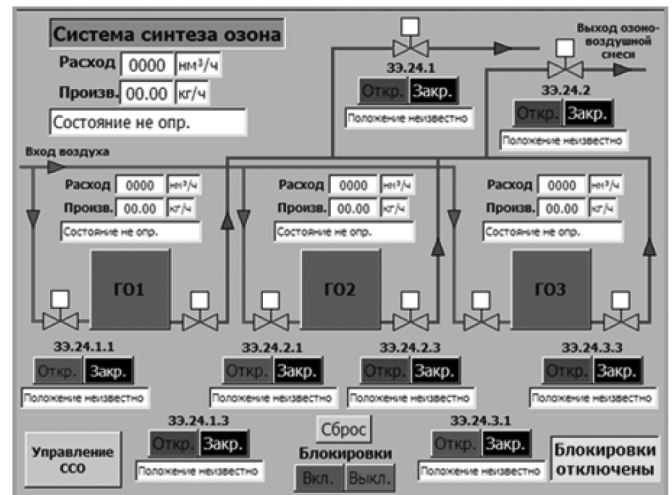


Рис. 3. Структура и мнемосхема системы синтеза озона

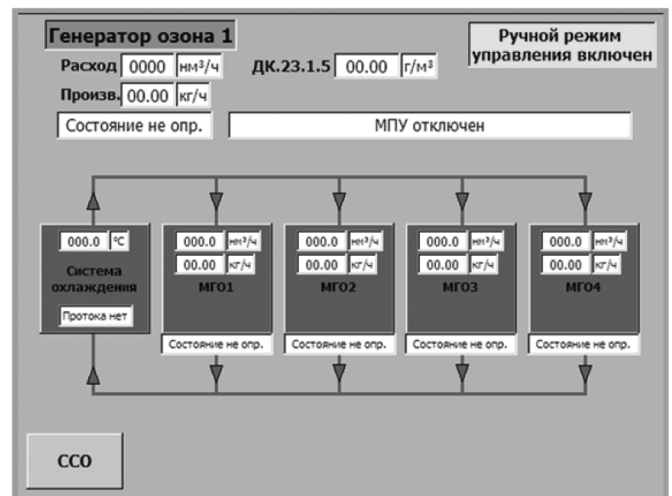


Рис. 4. Структура и мнемосхема отдельного генератора озона ОУ-25. МГОj — j-й модуль ГО

При необходимости (аварийная ситуация, регламент по графику и т.д.) автоматическая работа системы СИСТЕМА СИНТЕЗА ОЗОНА может быть остановлена как в целом, так и отдельными частями: например, один или несколько модулей озонирования или генераторов озона в целом могут быть выведены из работы. В последнем случае, авторизованный специалист с помощью этих мнемопанелей может управлять отдельными узлами системы. Это позволяет проводить регламентные, ремонтные и пуско-наладочные работы, не останавливая основной технологический процесс.

Вся информация, представленная на мнемосхемах, архивируется в журналах событий и параметрической информации. В журнале событий прежде всего фиксируются аварийные состояния того или иного узла системы и время формирования этого состояния. Событием также являются включения/выключение узлов, переключение задвижек трубопроводов в то или иное состояние и т.п. В журнале параметрической информации фиксируется вся цифровая информация системы в том числе данные контрольно измерительных приборов. Данные этих журналов позволяют разобраться в случае возникновения нештатных ситуаций, проанализировать работу элементов системы, а также выполнение основного предназначения системы — поддержание номинальной концентрации озона в потоке озono-воздушной смеси.

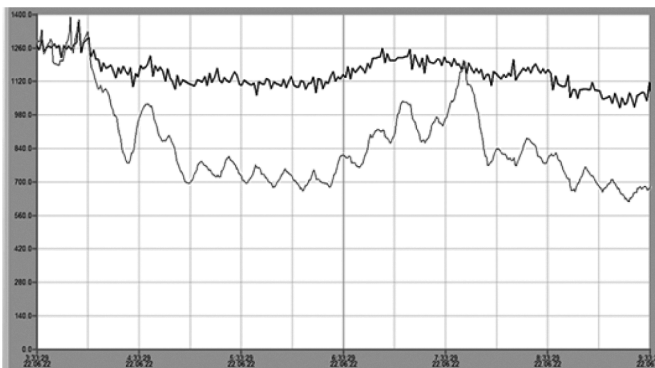


Рис. 5. Временные диаграммы параметров модуля генерации озона: расход озono-воздушной смеси через генератор озона, м³/час — черная линия; мощность отдельной сборки электродов, проценты — синяя линия (вся шкала — 100 %)

В качестве примера, на Рисунке 6 приведены данные выборки из журнала параметрической информации двух параметров: расхода озono-воздушной смеси через генератор озона, в котором установлены 4 модуля генерации озона и общая электрическая мощность потребляемая одним из модулей. За 6 часов работы, представленном на этом графике, расход озono-воздушной смеси изменяется в пределах 15–20%: от на-

чального уровня в 1300 м³/час в течение часа уменьшается до величины 1100 м³/час; затем медленно растет до 1200 м³/час и к концу представленной диаграммы падает до минимальной величины в 950 м³/час. Для поддержания номинальной концентрации озона АСУ системы синтеза озона, используя нечеткий алгоритм, в конечном счете, меняла электрическую мощность, потребляемую модулями генерации озона. Общее число таких модулей, установленных на Рублевской станции водоподготовки рано 16, в каждом из которых 4 источника питания. То есть, работа нечеткого алгоритма по поддержанию номинальной концентрации озона сводилась к индивидуальному управлению до 64 блоков питания.

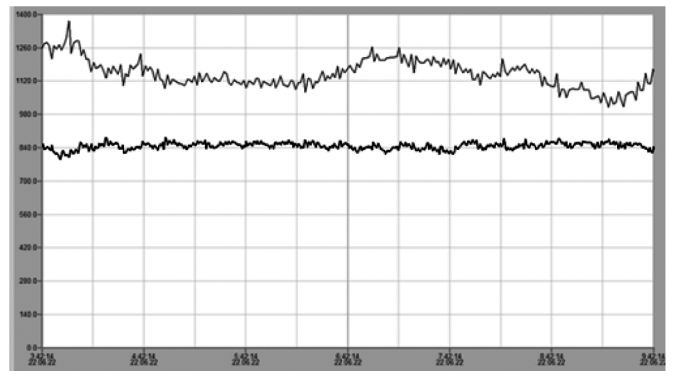


Рис. 6. Временные диаграммы параметров модуля генерации озона (МГО): расход озono-воздушной смеси через генератор озона, м³/час — черная линия; концентрация озона на выходе из модуля генератора озона — синяя линия (вся шкала — 20 г/м³),

Так как связь между электрической мощностью сборки электродов и выходной концентрацией, во-первых, индивидуальна для каждой из 64 сборки электродов, во-вторых — нелинейная. По этой причине, реакция АСУ на изменение потока озono-воздушной смеси для отдельной сборки электродов выглядит достаточно сложной — Рисунок 5, синяя линия, — полиэкстремальная кривая, которая в тоже время в среднем отслеживает изменение расхода озono-воздушной смеси. Концентрация озона при этом удерживается на номинальном уровне с вполне удовлетворительной точностью — Рисунок 6: на данном рисунке номинальная концентрация озона равнялась 12.0 г/м³.

Таким образом, индивидуальные характеристики, нелинейно связанные между собой, нескольких десятков разрядных сборок модулей генерации озона сводились системой управления, работающей по нечеткому алгоритму управления, к удержанию номинальной концентрации озона с более чем удовлетворительной точностью.

---

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. М: Мир, 1976. — С. 172–215
2. Корса-Вавилова Е.В., Науменко Э.В., Шмелев А.Я., Гибалов В.И., Божко В.И. Алгоритм управления дозой озонирования воды на водопроводных станциях Вестник СПГУТД. Серия 1, № 1, 2022. С. 130–134 с.
3. Беляев А.Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения мощности синхронных генераторов методами нейро-нечеткой идентификации, Санкт-Петербургский государственный технический университет, диссертация на соискание ученой степени к.т.н., 2020, 204 с.
4. Спицын В.Г. Разработка экспертных систем на основе нечетких правил вывода, Издательство ТПУ Томск 2011, 33 с.
5. Осовский С. Озоно-воздушная смесь. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. — 343 с.
6. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого правления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013 — 160 с.

---

© Корса-Вавилова Елена Викторовна (korsa\_elena@mail.ru); Науменко Эльвира Вячеславовна (Elvira.naumenko@yandex.ru);  
Гибалов Валентин Иванович (gibalov@medozone.ru); Божко Виктор Иванович (stud2010@rambler.ru); Шмелев Алексей Ярославович (shmelev.ay@mozo.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»