УДК 62.52

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

CONTROL SYSTEM OF A CELL BASED ON A FUZZY CONTROLLER

Е.А. Муравьева, Т.В. Григорьева, Д.Р. Салихова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Elena A. Muravyova, Tamara V. Grigoryeva, Dinara R. Salikhova

Ufa State Petroleum Technological University, Branch,
Sterlitamak, Russian Federation
e-mail: muraveva_ea@mail.ru

Аннотация. В данной работе разработана система управления электролизером на основе нечеткого регулятора. Объектом управления установка, является электролизная находящаяся территории на Акционерного общества «Башкирская содовая компания», где осуществляется производство хлора, водорода и электролитической щелочи методом диафрагменного электролиза.

Поставлена задача усовершенствования процесса диафрагменного электролиза и замены устаревшей системы управления на более новую и современную. В связи с этим спроектирован нечеткий регулятор для управления процессом электролиза, способный производить управление четырьмя выходными параметрами: изменение процента открытия электромагнитного клапана для подачи рассола в электролизер, изменение открытия регулирующего клапана для подачи асбестовой суспензии, изменение открытия регулирующего клапана на слив рассола через сливное устройство, уровень напряжения в электролизере. Четыре



управляющих выходных параметра осуществляют управление двумя входными параметрами: уровнем анолита и концентрацией NaOH. Регулирование выходных параметров осуществляется на основе полученной информации от входных датчиков концентрации NaOH и уровня анолита.

Разработан алгоритм управления, моделирование которого осуществляется с использованием интерактивной среды для программирования, численных расчетов и визуализации MATLAB.

Написание программы для программируемого логического контроллера Modicon M340 и его подключение произведены с помощью программной среды для разработки и программирования Schneider Electric Unity Pro 7.0. Создание интерфейса для автоматического управления процессом электролиза произведено посредством интегрированной SCADA-системы Vijeo Citect 7.2.

Внедрение автоматической системы управления, учитывающей основные параметры многосвязанного объекта и способной производить управление всем процессом электролиза, позволило решить поставленную проблему: стабилизацию входных параметров и управление выходными параметрами процесса.

Abstract. In this article, a control system for an electrolyzer based on a fuzzy controller is developed. The control object is an electrolysis unit located on the territory of the Bashkir Soda Company Joint-Stock Company, where chlorine, hydrogen and electrolytic alkali are produced by the method of diaphragm electrolysis.

The task is to improve the process of diaphragm electrolysis and replace the obsolete control system with a newer and more modern one. In this regard, a fuzzy controller was designed to control the electrolysis process, capable of controlling four output parameters: changing the percentage of opening of the electromagnetic valve to supply brine to the electrolyzer, changing the opening of the control valve to supply asbestos suspension, changing the opening of the



control valve to drain the brine through a drain device, voltage level in the cell. Four output parameters control two input parameters: anolyte level and NaOH concentration. The regulation of output parameters is carried out on the basis of information received from input sensors of NaOH concentration and anolyte level.

A control algorithm has been developed, the modeling of which is carried out using an interactive environment for programming, numerical calculations and visualization of MATLAB.

Program for the Modicon M340 programmable logic controller and its connection were made using the Schneider Electric Unity Pro 7.0 software development and programming environment. The creation of an interface for electrolysis process automatic control was carried out through the integrated SCADA-system Vijeo Citect 7.2.

The introduction of an automatic control system that takes into account the basic parameters of a multi-connected object and is able to control the entire electrolysis process has allowed us to solve the problem posed: input parameters stabilization and process output parameters control.

Ключевые слова: электролиз; автоматизация; нечеткий регулятор; алгоритм управления; концептуальная модель; разработка системы управления

Key words: electrolysis; automation; fuzzy controller; control algorithm; conceptual model; development of control system

Электрохимия – научное направление по изучению электрохимических процессов в растворах и расплавах веществ – появилась в начале прошлого века.

Целесообразность и актуальность использования электролиза заключается в том, что с его помощью относительно легко можно получить чистые металлы, массовая доля самого элемента в которых



стремится к 100 %. Такие металлы как натрий, никель, а также чистый водород и другие вещества, получают только с помощью этого метода [1].

Исследование электрохимических процессов, определение факторов, влияющих на них, установление новых способов использования процессов электролиза в промышленных условиях продолжается и сегодня, многие факторы еще не понятны, а детали требуют доработки [2, 3].

Первоочередная задача — усовершенствовать процесс диафрагменного электролиза, чтобы производство было наиболее выгодным, с наименьшими затратами электроэнергии и с наибольшим выходом продукции. При этом необходимо учитывать различные факторы, влияющие на количество и качество продуктов электролиза: поддержание, контроль и регулирование входных и выходных параметров данной установки [4].

Объектом управления является электролизная установка, находящаяся на территории Акционерного общества «Башкирская содовая компания» (АО «БСК»), где осуществляется производство хлора, водорода и электролитической щелочи методом диафрагменного электролиза.

Согласно Рабочему регламенту АО «БСК» цеха № 2 корпуса 101 за правильной работой электролизной установки непрерывно следит бригада высококвалифицированных специалистов. Главной целью системы (СУ) стабильной управления процессом поддержание является концентрации NaOH и оптимального уровня анолита (определённой величины в заданных технологами пределах). Анолит – водный раствор поваренной соли (рассол).

Необходимо заменить устаревшую СУ на более новую и современную, которая улучшит качество продукции, приведет к снижению затрат на производство и себестоимость продукции, а также обеспечит безопасность работников производства.



Описание технологического процесса

Электролизер расположен в отделении производства хлора, водорода и электролитической щелочи методом диафрагменного электролиза в корпусе 101 цеха № 2 АО «Башкирская содовая компания».

Электролиз растворов хлорида натрия в ваннах со стальным катодом и графитовым анодом позволяет получать электролитическую щелочь NaOH, хлор Cl_2 и водород H_2 в одном электролизере. При прохождении постоянного электрического тока через водный раствор хлорида натрия можно ожидать выделения хлора, а также кислорода:

$$2OH^--2\bar{e}\rightarrow 1/2O_2+H_2O$$

или

$$2Cl^{-}-2\bar{e}\rightarrow Cl_{2}$$
.

На графитовых анодах перенапряжение кислорода много выше перенапряжения хлора, и поэтому на них будет происходить в основном разряд ионов C1⁻ с выделением газообразного хлора по реакции.

На катоде в щелочном растворе происходит разряд молекул воды по уравнению:

$$H_2O + \bar{e} \rightarrow H + OH^-$$
.

Атомы водорода после рекомбинации выделяются в виде молекулярного водорода:

$$2H\rightarrow H_2$$
.

Разряд ионов натрия из водных растворов на твердом катоде невозможен вследствие более высокого потенциала их разряда по сравнению с водородом. Поэтому остающиеся в растворе гидроксильные ионы образуют с ионами натрия раствор щелочи. Процесс разложения NaCl можно выразить следующими реакциями:

$$2Cl - 2\bar{e} \rightarrow Cl_2$$



$$H_2$$
+ \bar{e} =2H + OH-,
2H \rightarrow H_2 .

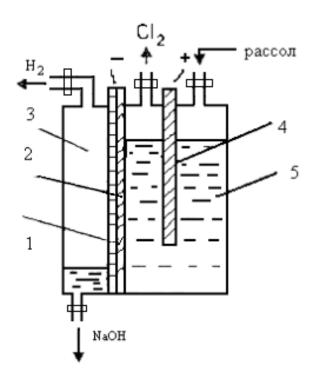
Объединив уравнения, получим:

$$2H_2 + 2Cl \rightarrow Cl_2 + H_2 + 2OH$$

или

$$2 \text{ H}_2\text{O} + 2\text{NaCl} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2\text{NaOH}.$$

Таким образом, на аноде идет образование хлора, на катоде – водорода и электролитической щелочи (рисунок 1).



- 1 перфорированный катод;
- 2 диафрагма;
- 3 катодное пространство;
- 4 -анод;
- 5 анодное пространство

Рисунок 1. Схема электролиза

Постановка задачи для разработки системы управления

Проанализируем взаимное влияние параметров процесса в работе. Электролизер состоит из анодного и катодного пространств, которые



собой фильтрующей диафрагмой (рисунок 1). разделены между Очищенный рассол NaCl через крышку электролизера подается в анодное пространство, регулирование подачи рассола осуществляется посредством электромагнитного клапана NaCl. На аноде с малым перенапряжением должен, в первую очередь, разряжаться кислород O_2 . Однако на графитовых анодах перенапряжение кислорода много выше перенапряжения хлора, и поэтому на них будет происходить в основном разряд ионов С1 с выделением газообразного хлора. На катоде в щелочном растворе происходит разряд молекул воды. Разряд ионов натрия из водного раствора на твердом катоде невозможен вследствие более высокого потенциала их разряда по сравнению с водородом. Поэтому остающиеся в растворе гидроксильные ионы образуют с ионами натрия Na⁺ раствор щелочи. Уровень анолита установлен в пределах 100–600 мм, он изменяется при подаче раствора NaCl, от которого также зависит концентрация NaOH.

Концентрация NaOH определяет качество раствора щелочи. Если концентрация будет выходить за установленные пределы 115–140 г/дм³, то щелочь отбраковывается. Во избежание такого исхода необходимо осуществлять регулирование концентрации NaOH и поддерживать её в заданных пределах, поэтому регулирования процессом посредством клапана на подаче рассола будет недостаточно.

Рассмотрим следующие параметры, влияющие на ведение технологического процесса. Несмотря на наличие диафрагмы продукты электролиза ПО различным причинам проникают катодного пространства в анодное и наоборот. Под действием приложенного напряжения некоторое количество гидроксильных ионов ОН проникает в анодное пространство, а кислых продуктов в катодное. Протекающий через диафрагму электролит содержит растворенный хлор, ионы ClO и ClO₃. Растворенный хлор, реагируя со щелочью, образует гипохлориты NaOCl и хлораты натрия NaClO₃. Побочные процессы в катодном



пространстве носят также характер частичного восстановления хлорат- и гипохлорит-ионов.

$$ClO_{3}^{-} + 6H^{+} + 6e \rightarrow Cl^{-} + 3H_{2}O,$$

 $ClO^{-} + 2H^{+} + 2e \rightarrow Cl^{-} + H_{2}O.$

Таким образом, побочные реакции приводят К изменнению концентрации NaOH. Чтобы уменьшить протекание побочных реакций, следует создать условия, препятствующие смешению катодных и анодных Для придания необходимой протекаемости диафрагме, продуктов. необходимо заливать асбестовую суспензию. Асбестовая пульпа заполняет диафрагму, и протекание побочных реакций уменьшается. Причем, плотность раствора NaCl и плотность асбестовой суспензии абсолютно разные, таким образом, их молекулы не взаимодействуют друг с другом.

Полученная щелочь отводится через штуцер в нижней части катодного пространства, на котором также имеется регулирующий клапан. Но слив щелочи будет осуществляться лишь при допустимых нормах: концентрация NaOH 115–140 г/дм³ и уровень анолита 100–600 мм.

Важным параметром является уровень напряжения на пластинах электролизера, который составляет 3,1–3,9 В и регулируется при помощи регулятора напряжения: меньшее значение «не запустит» процесс, а большее приведет к чрезмерному расходу энергии, идущей на нагрев электролита. Таким образом, при известных значениях величины концентрации и уровня анолита регулятор напряжения выдает значение напряжения для осуществления процесса.

Для решения поставленной задачи и управления описанным процессом необходимо внедрение автоматической системы управления, способной производить нелинейное управление следующими параметрами: четырьмя выходными параметрами: количество заливаемой суспензии и рассола, количество сливаемого раствора и напряжение на обкладках



электролизера, которые зависят *от двух входных*: уровень анолита и концентрация NaOH.

Для управления такой многосвязной системой необходимо разработать систему управления процессом электролиза с использованием нечеткого регулятора [5–8].

Концептуальная модель нечеткого регулятора

Для управления процессом электролиза при помощи нечеткого регулятора необходим следующий набор данных. Набор данных представляет собой набор значений входных и выходных переменных объекта (рисунок 2).

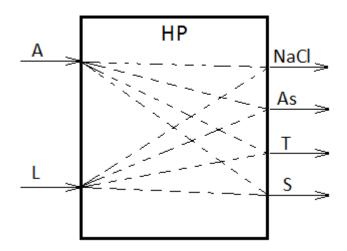


Рисунок 2. Концептуальная модель нечеткого регулятора для управления электролизером

В многомерной системе процесса электролиза необходимо учесть следующие входные и выходные параметры для управления электролизной установкой.

Входные параметры:

- 1) концентрация NaOH A, (115–140) г/дм³;
- 2) уровень анолита L, (100-600) мм.

Выходные параметры:



- 1) процент открытия электромагнитного клапана для подачи рассола в электролизер NaCl, (0–100) %;
- 2) процент открытия электромагнитного клапана для залива асбестовой суспензии As, (0–100) %;
 - 3) уровень напряжения на пластинах электролизера Т, (0–100) %;
- 4) процент открытия электромагнитного клапана для слива NaOH через сливное устройство S, (0–100) %.

Описание лингвистических переменных

Лингвистические переменные входов и выходов нечеткого регулятора описываются диапазоном четких значений и функциями принадлежности для каждого терма.

Входные переменные:

1) концентрация NaOH в католите A, $r/дм^3$ (рисунок 3):

 A_1 – «Концентрация NaOH = менее установленной», где $108 \le A_1 \le 122 \ (\Gamma/дм^3);$

 A_2 – «Концентрация NaOH = в норме», где 118 $\leq A_2 \leq 132$ (г/дм³);

 A_3 – «Концентрация NaOH = более установленной», где $128 \le A_3 \le 142 \ (\Gamma/дм^3).$

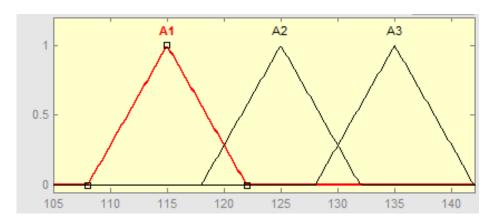


Рисунок 3. Задание входной переменной А

2) Уровень анолита в электролизере – L, мм (рисунок 4):



 L_1 — «Уровень анолита в электролизере = низкий», где $90 \le L_1 \le 290 \, (\text{мм});$

 L_2 — «Уровень анолита в электролизере = в норме», где $250 \le L_2 \le 450$ (мм);

 L_3 — «Уровень анолита в электролизере = высокий», где $410 \le L_3 \le 610$ (мм).

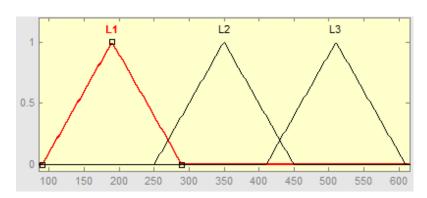


Рисунок 4. Задание входной переменной L

Выходные переменные:

1) Процент открытия клапана электромагнитного, регулирующий подачу рассола в электролизер – NaCl, % (рисунок 5):

 $NaCl_1$ — «Процент открытия клапана = Закрыт», где $0 \le NaCl_1 \le 38$ (%);

 $NaCl_2$ — «Процент открытия клапана = Полуоткрыт», где $32 \le NaCl_2 \le 68$ (%);

 $NaCl_3$ — «Процент открытия клапана = Открыт», где $62 \le NaCl_3 \le 100$ (%).

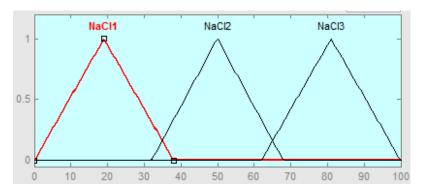


Рисунок 5. Задание выходной переменной NaCl



2) Уровень падения напряжения – Т, % (рисунок 6):

 T_1 — «Процент уровня падения напряжения = минимальный», где $0 \le T_1 \le 38 \, (\%);$

 T_2 — «Процент уровня падения напряжения = оптимальный», где $32 \le T_2 \le 68$ (%);

 T_3 — «Процент уровня падения напряжения = максимальный», где $62 \le T_3 \le 100 \, (\%)$.

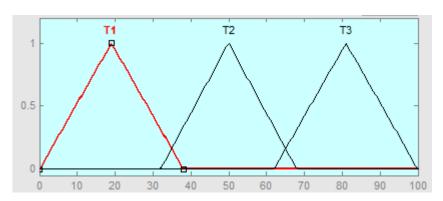


Рисунок 6. Задание выходной переменной Т

3) Процент открытия клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии – As, % (рисунок 7).

 As_1 – «Процент открытия клапана = Закрыт», где $0 \le As_1 \le 38$ (%);

 As_2 – «Процент открытия клапана = Полуоткрыт», где $32 \le As_2 \le 68$ (%);

 As_3 – «Процент открытия клапана = Открыт», где $62 \le As_3 \le 100$ (%).

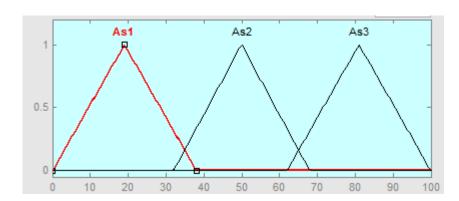


Рисунок 7. Задание выходной переменной As

4) Процент открытия клапана, регулирующего слив щелочи – S, % (рисунок 8).



 S_1 – «Процент открытия клапана = Закрыт», где $0 \le S_1 \le 38$ (%);

 S_2 – «Процент открытия клапана = Полуоткрыт», где $32 \le S_2 \le 68$ (%);

 S_3 – «Процент открытия клапана = Открыт», где $62 \le S_3 \le 100$ (%).

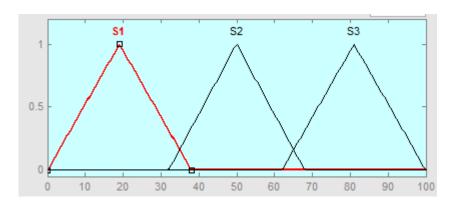


Рисунок 8. Задание выходной переменной S

Алгоритм управления

Данная система управления должна поддерживать 2 входных параметра: концентрацию NaOH «А» и уровень анолита «L», при этом в СУ имеется 4 выходных параметра: регулирующий клапан для подачи рассола в электролизер «NaCl», регулирующий клапан для подачи асбестовой суспензии «Аs», уровень падения напряжение на пластинах электролизера «Т», регулирующий клапан для слива щелочи «S». Имеет место влияние указанных 4-х выходных параметров на 2 входных.

Регулирование выходных параметров осуществляется на основе полученной информации с входных датчиков концентрации и уровня анолита.

Рассмотрим некоторые возможные ситуации управления, которые могут возникнуть в ходе проведения технологического процесса.

Вариант 1. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в диапазоне $108 \le A_1 \le 122 \text{ г/дм}^3$ и уровне анолита $L - 90 \le L_1 \le 290 \text{ мм}$. После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:



Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $62 \le \text{NaCl}_3 \le 100$ (%), поскольку с повышением концентрации соли в рассоле, поступающем на электролиз, величина концентрации щелочи увеличивается, а также увеличивается и уровень анолита.

- 1. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $32 \le T_2 \le 68$ (%), поскольку концентрация и уровень анолита низкие, то большее значение напряжения приведет к перерасходу энергии, также перенапряжение является следствием относительно малой скорости электрохимических процессов, следовательно, медленного протекания процесса. А скорость процессов связана с наличием, так называемой, энергии активации. Чтобы принимать участие в электронных процессах, частицы должны обладать известным запасом энергии, называемым энергией активации. Не имея этой энергии, они не могут вступить в реакцию.
- 2. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $62 \le \mathrm{As}_3 \le 100$ (%), т.к. низкая концентрация NaOH обуславливается высокой протекаемостью диафрагмы, приводящей к появлению целого ряда вторичных побочных реакций из-за проникновения ионов OH $^-$ из катодного пространства в анодное. При низком уровне анолита протекание побочных реакций и образование побочных продуктов увеличивается еще больше. Таким образом, необходимо уменьшить протекаемость диафрагмы.
- 3. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $0 \le S_1 \le 38$ (%), т.к. концентрация NaOH и уровень анолита имеют значения, находящееся в низких пределах, лишь при их увеличении степень открытия клапана можно увеличить.

Вариант 2. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $108 \le A_1 \le 122 \ (г/дм^3)$ и уровне анолита $-250 \le L_2 \le 450 \ (мм)$. После



анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $32 \le \text{NaCl}_2 \le 68$ (%), таким образом, мы получим повышение концентрации соли в рассоле, поступающем в электролизер, за счет чего концентрация щелочи увеличивается, а уровень анолита становится оптимальным.
- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $32 \le T_2 \le 68$ (%), перенапряжение приведёт к относительной малой скорости электрохимических процессов, следовательно, к медленному протеканию процесса. Поскольку концентрация низкая, необходимо как можно быстрее отрегулировать течение процесса, и дать частицам скорее вступить в реакцию. Но уровень анолита средний, поэтому большее значение напряжения, чем значение, установленное в средних пределах, приведет к перерасходу энергии. Таким образом, нечеткий регулятор устанавливает значение выходного параметра в средних пределах, чтобы произвести регулирование сразу двух входных параметров.
- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии в пределах $62 \le \mathrm{As}_3 \le 100$ (%), т.к. значение концентрации NaOH, установленной в нижних пределах, обуславливается высокой протекаемостью диафрагмы, приводящей к появлению целого ряда вторичных побочных реакций из-за проникновения ионов ОН из катодного пространства в анодное. При этом большая пористость диафрагмы приведёт к проникновению в катодное пространство из анодного большего количества растворенного в анолите хлора, и анионы ClO^- и ClO_3^- , которые восстанавливаясь на катоде, снижают образование щелочи NaOH на катоде.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $32 \le S_2 \le 68$ (%), т.к. концентрация NaOH находится в низких пределах, но уровень анолита в электролизере в средних пределах. Поэтому нечеткий регулятор



устанавливает значение положения клапана в средних пределах, которое произведёт необходимое регулирование значений сразу двух входных параметров.

- **Вариант** 3. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $108 \le A_1 \le 122$ (г/дм³), и уровне анолита $-410 \le L_3 \le 610$ мм. После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:
- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $0 \le \text{NaCl}_1 \le 38$ (%), поскольку большая подача рассола приведёт к перезаполнению ванны анолитом, а уровень анолита высок. Но поскольку концентрация находится в низких пределах, необходимо как повысить концентрацию NaOH, так и не допустить перезаполнение электролизной ванны.
- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $62 \le T_3 \le 100$ (%), т.к. уровень анолита высокий, и потребуется большее значение напряжения, идущего на его нагрев.
- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $32 \le \mathrm{As}_2 \le 68$ (%), при низкой концентрации щелочи и высоком уровне анолита подачи асбестовой суспензии в средних значениях будет достаточно.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $62 \le S_3 \le 100$ (%), т.к. это приведёт к большей скорости протекания анолита в катодное пространство и меньшему проникновению ионов ОН $^-$ в анодное пространство, и тем меньше будет образование побочных реакций и побочных продуктов.
- **Вариант** 4. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $118 \le A_2 \le 132$ (г/дм³), и уровне анолита $-90 \le L_1 \le 290$ (мм). После



анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $62 \le \text{NaCl}_3 \le 100$ (%), поскольку необходимо поднять уровень анолита. Нечеткий регулятор установит значение таким образом, чтобы отрегулировать уровень анолита, но и не превысить концентрацию щелочи вследствие повышения концентрации соли в рассоле.
- 2. Уровень падения напряжения электролизера на пластинах $0 \le T_1 \le 38$ (%), поскольку для значения концентрации щелочи в среднем диапазоне уровня напряжения в заданных пределах будет достаточно, ведь перенапряжение приведёт К относительной малой электрохимических процессов, следовательно, к медленному протеканию процесса. К тому же, при низком уровне анолита большее значение напряжения приведет к перерасходу энергии.
- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $32 \le \mathrm{As}_2 \le 68$ (%), поскольку в случае концентрации, находящейся в средних пределах, и уровне анолита, находящегося в низких пределах, необходимо поддерживать протекаемость диафрагмы путем заполнения пор диафрагмы асбестовой суспензией, для препятствия образования вторичных побочных реакций, путём проникновения ионов ОН $^-$ из катодного в анодное пространство.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $0 \le S_1 \le 38$ (%), т.к. уровень анолита находится в низких пределах, а концентрация NaOH в средних. Таким образом, нечеткий регулятор устанавливает положение клапана так, чтобы дать вытечь щелочи и при этом не допустить уменьшения заданного уровня анолита.
- **Варианм** 5. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в средних пределах $118 \le A_2 \le 132$ (г/дм³), и уровне анолита $-250 \le L_2 \le 450$ (мм).



После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер, $32 \le \text{NaCl}_2 \le 68$, т.к. и уровень анолита, и концентрация щелочи находятся в средних значениях, и достаточно поддержания оптимального режима работы.
- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $32 \le T_2 \le 68$ (%), поскольку данное значение в средних пределах удовлетворяет значениям в средних пределах входных параметров.
- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $0 \le \mathrm{As}_1 \le 38$ (%), при значениях входных параметров, установленных в средних пределах. Поскольку протекаемость асбестовой диафрагмы во время эксплуатации ванн не остается постоянной, она постепенно уменьшается, вначале быстро вследствие набухания волокна, в дальнейшем более медленно благодаря заполнению пор основными соединениями Ca, Mg и твердыми взвешенными в растворе частицами. Таким образом, минимального открытия клапана будет достаточно.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи, при значениях уровня анолита и концентрации NaOH, находящихся в среднем диапазоне, нечеткий регулятор устанавливает в пределах $32 \le S_2 \le 68$ (%) для оптимального режима работы.

Вариант 6. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, которая находится в пределах $118 \le A_2 \le 132$ (г/дм³), и уровне анолита $-410 \le L_3 \le 610$ (мм). После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $0 \le \text{NaCl}_1 \le 38$ (%), т.к. большее значение приведёт к переполнению ванны, поскольку значение уровня анолита находится близко к максимуму. Для концентрации NaOH, находящейся в среднем диапазоне,



незначительное повышение концентрации соли в рассоле, поступающем на электролиз, допустимо.

- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $62 \le T_3 \le 100$ (%), меньшее значение напряжения при уровне анолита, находящемся в высоком диапазоне, не позволит запустить процесс.
- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $0 \le \mathrm{As}_1 \le 38$ (%), т.к. при средних значениях концентрации щелочи заданное значение подачи асбестовой суспензии будет препятствовать появлению незначительных побочных реакций. Также при высоком содержании анолита в ванне подачи асбестовой суспензии в средних значениях будет достаточно.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $62 \le S_3 \le 100$ (%), т.к. мы имеем среднее значение концентрации и высокое содержание анолита в ванне электролизера.

Вариант 7. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $128 \le A_3 \le 142 \ (\Gamma/дм^3)$, и уровне анолита $-90 \le L_1 \le 290 \ \text{мм}$. После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер 32 ≤ NaCl₂ ≤ 68 (%), т.к. повышение концентрации соли в рассоле, поступающем на электролиз, приведёт к увеличению концентрации щелочи, но при низком уровне анолита подача NaCl не может устанавливаться в меньших значениях. Таким образом, нечеткий регулятор устанавливает значение положения клапана, которое не превысит концентрацию NaOH и не понизит уровень анолита ниже минимально допустимого.
- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $0 \le T_1 \le 38$ (%), т.к. мы имеем уровень анолита в низких пределах, большее значение напряжения приведет к перерасходу энергии. Но



поскольку концентрация NaOH находится в высоких пределах, то нечеткий регулятор устанавливает такое значение уровня напряжения, которое произведет необходимое регулирование значений сразу двух входных параметров.

- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $62 \le \mathrm{As}_3 \le 100$ (%). Направление движения анолита в порах диафрагмы противоположно направлению движения ОН $^-$. Если скорость анолита в порах равна скорости движения ОН $^-$, то последние в диафрагме будут как бы неподвижны, и не будут переноситься в анодное пространство. Но т.к. концентрация NaOH находится в высоких пределах, то ионы ОН $^-$, переходят в анодное пространство больше, чем анолит, находящийся в низких пределах, что приведёт к образованию побочных реакций и побочных продуктов.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $0 \le S_1 \le 38$ (%), чтобы дать вытечь полученной щелочи и, при этом, иметь достаточно времени, чтобы набрать необходимый уровень анолита.

Вариант 8. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $128 \le A_3 \le 142 \ (\Gamma/дм^3)$, и уровне анолита $-250 \le L_2 \le 450 \ (\text{мм})$. После анализа полученных результатов нечеткий регулятор устанавливает выходные параметры:

- 1. Положение клапана, регулирующего подачу рассола в электролизер $32 \le \text{NaCl}_2 \le 68$ (%), поскольку для оптимального ведения процесса подача рассола необходима, и в средних значениях при данных входных параметрах её будет более чем достаточно.
- 2. Уровень падения напряжения на пластинах электролизера $32 \le T_2 \le 68$ (%), поскольку уровень анолита находится в пределах среднего значения, и большее значение напряжения приведет к перерасходу энергии.



- 3. Положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии $62 \le \mathrm{As}_3 \le 100$ (%). Направление движения анолита в порах диафрагмы противоположно направлению движения ОН $^-$. Если скорость анолита в порах равна скорости движения ОН $^-$, то последние в диафрагме будут как бы неподвижны и не будут переноситься в анодное пространство. Но поскольку концентрация NaOH находится в высоких пределах, то ионы ОН $^-$, переходят в анодное пространство больше, чем анолит, находящийся в средних пределах, что приведёт к образованию побочных реакций и побочных продуктов. Таким образом, необходима подача асбестовой суспензии в максимальных пределах, для предотвращения образования побочных реакций и побочных продуктов.
- 4. Положение клапана, регулирующего слив щелочи $0 \le S_1 \le 38$ (%), чтобы дать вытечь полученной щелочи и, при этом, иметь достаточно времени, чтобы набрать необходимый уровень анолита.

Вариант 9. На нечеткий регулятор поступают данные, свидетельствующие о концентрации NaOH, находящейся в пределах $128 \le A_3 \le 142 \; (\Gamma/дм^3)$, и уровне анолита $-410 \le L_3 \le 610 \; (\text{мм})$.

В данном варианте рассматриваются максимально высокие показатели входных параметров, при которых ванну отключают для промывки диафрагмы.

Для разработки нечеткого алгоритма зададим продукционные правила:

- 1. ЕСЛИ $A=A_1$ И $L=L_1$, то $NaCl=NaCl_3$, $T=T_2$, $As=As_1$, $S=S_1$.
- $ECЛИ\ A=$ Низкий $U\ L=$ Низкий, то NaCl = Открыт, T= Оптимальный, As= Закрыт, S= Закрыт.
- 2. ЕСЛИ A = A1 И L = L2, то NaCl = NaCl2, T = T2, As = As3, S = S2.

ЕСЛИ A = Низкий И L = В норме, то NaCl = Полуоткрыт, $T = \text{Оптимальный, As} = \text{Открыт, S} = \Pi \text{олуоткрыт.}$

3. ЕСЛИ $A = A_1$ И $L = L_3$, то $NaCl = NaCl_1$, $T = T_3$, $As = As_2$, $S = S_3$.



ECЛИ A = Низкий И L = Высокий, то NaCl = Закрыт, <math display="block">T = Mаксимальный, As = Полуоткрыт, S = Закрыт.

4. ЕСЛИ $A = A_2$ И $L = L_1$, то $NaCl = NaCl_3$, $T = T_1$, $As = As_2$, $S = S_1$.

ЕСЛИ A = В норме И L = Низкий, то NaCl = Открыт,

- T = Mинимальный, As = Полуоткрыт, S = Закрыт.
- 5. ЕСЛИ $A = A_2$ И $L = L_2$, то $NaCl = NaCl_2$, $T = T_2$, $S = S_2$, $As = As_1$.

ЕСЛИ A = B норме И L = B норме, то NaCl = Полуоткрыт,

- T = Oптимальный, S = Полуоткрыт, As = Закрыт.
- 6. ЕСЛИ $A = A_2 II L = L_3$, то $NaCl = NaCl_1$, $T = T_3$, $As = As_1$, $S = S_3$.

ЕСЛИ A = В норме И L = Высокий, то NaCl = Закрыт,

- T = Максимальный, As = Закрыт, S = Открыт.
- 7. ЕСЛИ $A = A_3$ И $L = L_1$, то $NaCl = NaCl_2$, $T = T_1$, $As = As_3$, $S = S_1$.

ЕСЛИ A = Высокий И L = Низкий, то NaCl = Полуоткрыт,

- T = Минимальный, As = Открыт, S = Закрыт.
- 8. ЕСЛИ $A = A_3$ И $L = L_2$, то $NaCl = NaCl_2$, $T = T_2$, $As = As_3$, $S = S_1$.

ЕСЛИ A = Высокий И L = В норме, то NaCl = Полуоткрыт,

- T = Оптимальный, As = Открыт, S = Закрыт.
- 9. ЕСЛИ $A = A_3 H L = L_3$, то $T = T_1$.

ЕСЛИ A = Высокий И L = Высокий, то T = Минимальный.

Моделирование системы управления в MATLAB

Проведем моделирование разработанного алгоритма с использованием FIS Editor в MATLAB (переменные указаны в разделе «Описание лингвистических переменных» данной статьи), представленное на рисунке 9.



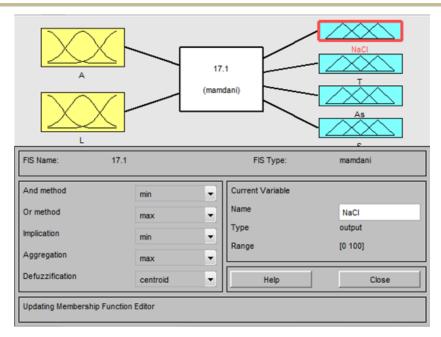


Рисунок 9. Задание концептуальной модели в MATLAB

Для задания лингвистических переменных будем использовать 3 терма с треугольными функциями принадлежности. Переменные А – концентрация NaOH, L – уровень анолита, NaCl – процент открытия клапана, регулирующего подачу рассола, Аs – процент открытия клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии, S – процент открытия клапана, регулирующего слив щелочи, Т – уровень падения напряжения на пластинах электролизера приведены на рисунках 10–15.

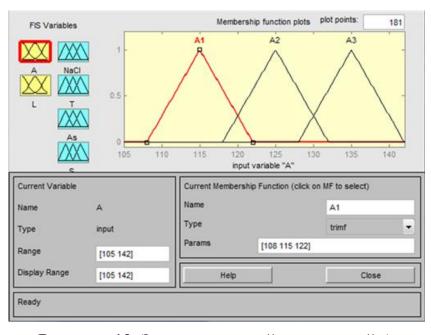


Рисунок 10. Задание входной переменной А

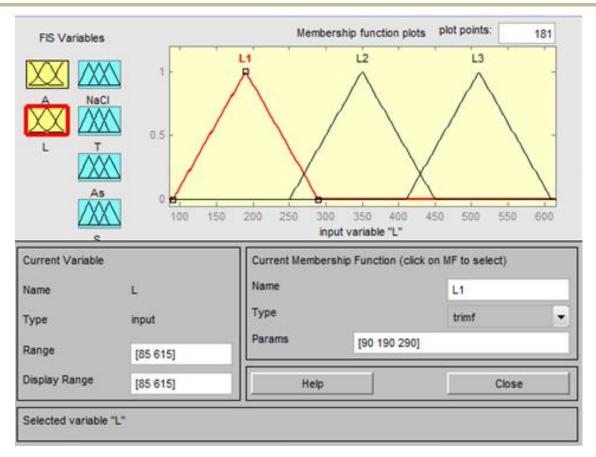


Рисунок 11. Задание входной переменной L

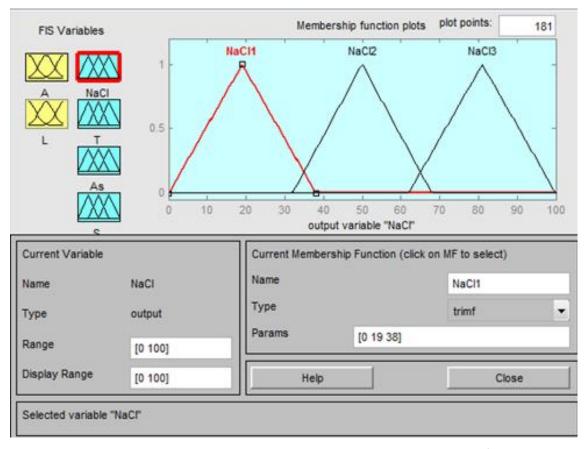


Рисунок 12. Задание выходной переменной NaCl

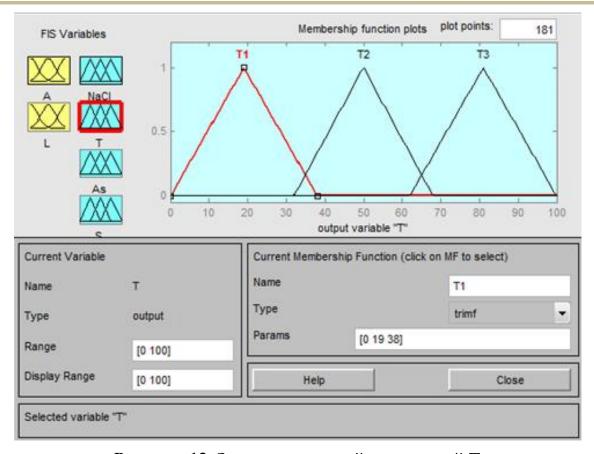


Рисунок 13. Задание выходной переменной Т

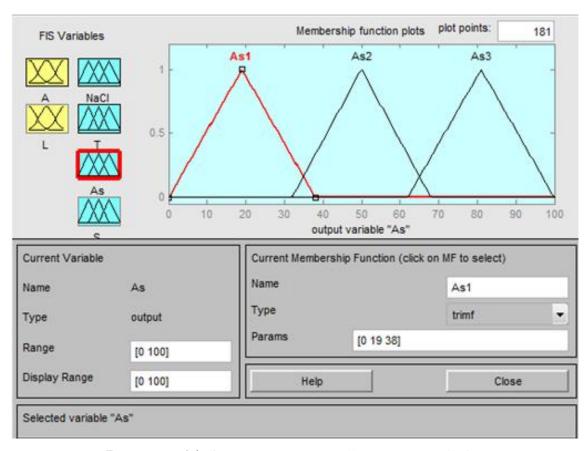


Рисунок 14. Задание выходной переменной As



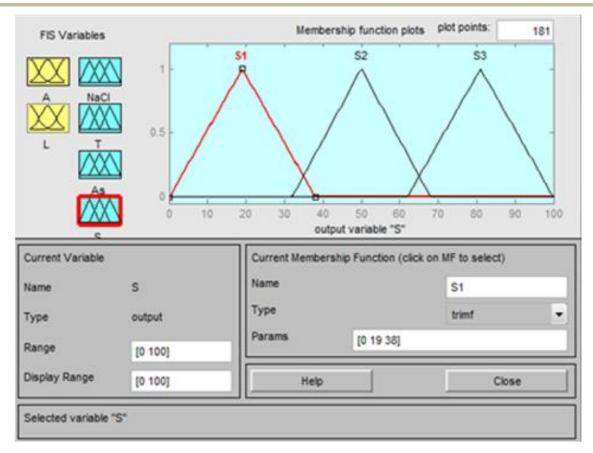


Рисунок 15. Задание выходной переменной S

Введем заданную базу правил, связывающую входные и выходные переменные и реализующую алгоритм управления электролизером (рисунок 16).

```
1. If (A is A1) and (L is L1) then (NaCl is NaCl3)(T is T2)(As is As1)(S is S1) (1)
2. If (A is A1) and (L is L2) then (NaCl is NaCl2)(T is T2)(As is As3)(S is S2) (1)
3. If (A is A1) and (L is L3) then (NaCl is NaCl1)(T is T3)(As is As2)(S is S3) (1)
4. If (A is A2) and (L is L1) then (NaCl is NaCl3)(T is T1)(As is As2)(S is S1) (1)
5. If (A is A2) and (L is L2) then (NaCl is NaCl2)(T is T2)(As is As1)(S is S2) (1)
6. If (A is A2) and (L is L3) then (NaCl is NaCl1)(T is T3)(As is As1)(S is S3) (1)
7. If (A is A3) and (L is L1) then (NaCl is NaCl2)(T is T1)(As is As3)(S is S1) (1)
8. If (A is A3) and (L is L1) then (NaCl is NaCl2)(T is T2)(As is As1)(S is S1) (1)
9. If (A is A3) and (L is L1) then (NaCl is NaCl1)(T is T1)(As is As1)(S is S1) (1)
```

Рисунок 16. Набор правил

Проверим работу модели.

При концентрации NaOH A = 130 г/дм^3 и уровне анолита L = 443 мм открытие электромагнитного клапана на подаче рассола составляет NaCl = 25,5 %, открытие клапана залива асбестовой суспензии As = 33,1 %,



открытие клапана слива щелочи S = 64,6 % и уровень падения напряжения T = 74,5 % (рисунок 17).

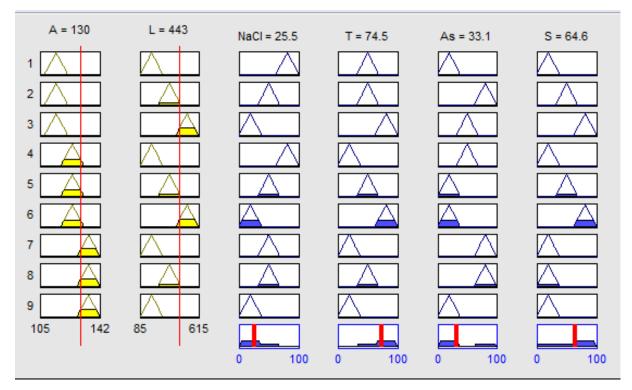


Рисунок 17. Тестовый набор

Реализация системы управления в Unity Pro и Vijeo Citect

Для корректной работы установки автоматического контроля и регулирования входных и выходных параметров необходимо произвести настройку оборудования, которое входит в состав установки.

Дополнительной настройки требуют контроллер и компьютер, к которому будет производиться подключение контроллера.

Подключение программируемого логического контроллера будем осуществлять с помощью программного средства Unity Pro, управление контроллером будет осуществляться с компьютером посредством SCADA-системы Vijeo Citect. Связь с контроллером осуществляется по протоколу TCP/IP.

Создание программы для управления установкой осуществляется на языке ST. Окно редактора переменных указано на рисунке 18.



Name -	Type ▼	Address ▼	Value	Comment .	Time stamping
— ● A	INT	%MW01			
— 🅩 As	REAL	%MW10			
— ◆ NaCl	REAL	%MW06			
- ⇒ L	INT	%MW02			
— 🐤 s	REAL	%MW04			
— ● T	REAL	%MW08			
- b					

Рисунок 18. Описание входных и выходных переменных

В программе объявлены следующие переменные:

- А концентрация NaOH;
- L уровень анолита в электролизёре;
- NaCl положение клапана, регулирующего подачу NaCl;
- As положение клапана, регулирующего подачу асбестовой суспензии;
 - Т уровень падения напряжения на обкладках электролизёра;
 - S положение клапана, регулирующего слив щелочи.

Управление установкой представлено на рисунке 19.

```
if (A>=108 and A<=122) and (L>=90 and L<=290) then
NaC1:=81.0:
T:=50.0;
Asit12;
elsif (A>=108 and A<=122) and (L>=250 and L<=450) then
NaC1:=53.4;
T:=50.0;
As:=74.1:
3:=46.6;
elsif (A>=108 and A<=122) and (L>=410 and L<=610) then
NaCl:=38.7;
T:=61.3;
As:=70.5;
s:=61.3;
elsif (A>=118 and A<=132) and (L>=90 and L<=290) then
NaC1:=81.0;
TiEl2;
As: =50:
```

Рисунок 19. Фрагмент управляющей программы на языке ST

Проверили работоспособность программы с помощью «Animation table» (рисунок 20).



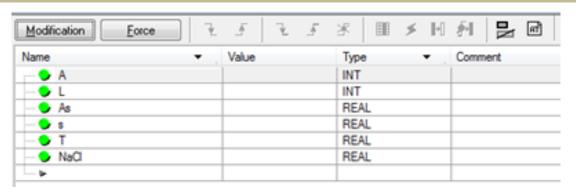


Рисунок 20. Animation table

Автоматизированное рабочее место оператора (APM) системы управления установкой создано в SCADA-системе Vijeo Citect, оно удобно отображает технологический процесс.

Делаем экспресс-настройку устройств ввода/вывода, эта функция автоматически настроит наш компьютер для работы с программируемым логическим контроллером, используя минимум параметров, введенных разработчиком SCADA-системы. Далее создаём переменные теги, ориентируясь на ранее созданные переменные в программе Unity Pro (рисунок 21).

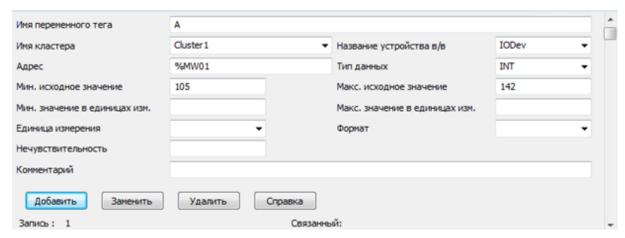


Рисунок 21. Описание переменных тегов

Для того чтобы для готовой программы провести успешную компиляцию, создаем серверы трендов и сервер ввода/вода.

Для наглядного изображения создадим графическую страницу технологического процесса. На созданном экране есть возможность ввода значений входных переменных, приборов для отображения значений



выходных переменных, а также визуализации технологического процесса (рисунок 22).

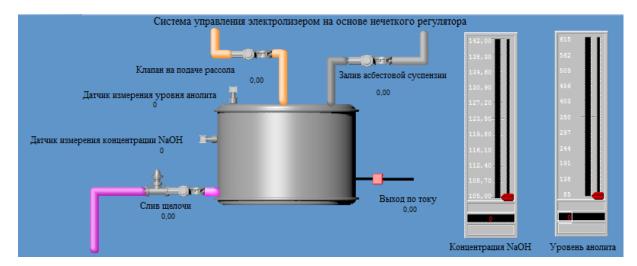


Рисунок 22. Визуализация процесса в среде Vijeo Citect

Изменяя значения входных переменных, можно наблюдать изменения значений выходных параметров и изменение положения клапанов (рисунок 23).

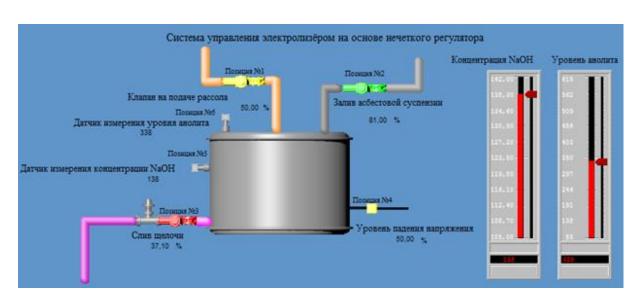


Рисунок 23. Изменения при запуске программы

Выводы

В ходе работы был спроектирован нечеткий регулятор для управления процессом электролиза, который позволяет проводить регулирование открытия клапана подачи рассола в электролизер, клапана для залива



асбестовой суспензии, клапана для слива щелочи и вычисление значения для регулятора напряжения в зависимости от концентрации NaOH в католите и уровня анолита в электролизере.

Нечеткий алгоритм был реализован в программах MATLAB, Unity Pro и Vijeo Citect.

Настроена многомерная система управления. Нечеткий регулятор учитывает взаимные влияния входных параметров: концентрации NaOH и уровня анолита на выходные: изменение процента открытия электромагнитного клапана для подачи рассола в электролизер, изменения открытия регулирующего клапана для подачи асбестовой суспензии, изменение открытия регулирующего клапана на слив рассола через сливное устройство, уровень напряжения в электролизере.

Внедрение автоматической системы управления, учитывающей основные параметры многосвязанного объекта и способной производить управление всем процессом электролиза, позволило решить поставленную проблему: стабилизация входных параметров и управление выходными параметрами процесса.

Список используемых источников

- 1. Федотьев Н.Н., Алабышев А.Ф., Рогинян А.Л., Вячеславов Н.М., Животинский П.Б., Гальнбек А.А. Прикладная электрохимия. Л.: Химия, 1962. 405 с.
- 2. Основы процесса электролиза. URL: http://lovi5.ru/natural_sciences/18031.htm (дата обращения: 23.08.2019).
- 3. Киреев Р.С. Создание лабораторной установки для автоматического контроля и регулирования температуры посредством интегрированной системы Vijeo Citect 7.2 и программной среды для разработки и программирования ПЛК Schneider Electric Unity Pro 7.0 // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2015. № 3 (3). С. 64-77.



- 4. Современные промышленные способы получения хлора и едкого натра // Получение хлора методом электролиза поваренной соли. URL: https://works.doklad.ru/view/_8f59WsvPxs/all.html (дата обращения: 23.08.2019).
- 5. Muravyova E. A., Bogdanov A. V. Software Implementation of the Accurate Regulators a Three-Dimensional Object: Heating Chamber Evaporator Heater Steam Boiler // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. Vladivostok, Russia. 2018. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8602917 (accessed: 14.07.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602917.
- 6. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Bondarev A.V. Method for Increasing the Speed and Reducing the Error of Multidimensional Precise Logic Controller // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. Vladivostok, Russia. 2018. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8602643 (accessed: 14.07.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602643.
- 7. Muravyova E.A., Uspenskaya N.N. Development of a Neural Network for a Boiler Unit Generating Water Vapour Control // Optical Memory and Neural Networks. 2018. Vol. 27. No. 4. P. 297-307.
- 8. Muravyova E.A., Bondarev A.V., Sharipov M.I., Galiaskarova G.R., Kubryak A.I. Power Consumption Analysis of Pump Station Control Systems Based on Fuzzy Controllers with Discrete Terms in iThink Software // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, Russian Federation. 2018. Vol. 327. (2). DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022072.

References

1. Fedot'ev N.N., Alabyshev A.F., Roginyan A.L., Vyacheslavov N.M., Zhivotinskii P.B., Gal'nbek A.A. *Prikladnaya elektrokhimiya* [Applied Electrochemistry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1962. 405 p. [in Russian].



- 2. Osnovy protsessa elektroliza [Basics of Electrolysis Process]. Available at: http://lovi5.ru/natural_sciences/18031.htm (accessed 23.08.2019). [in Russian].
- 3. Kireev R.S. Sozdanie laboratornoi ustanovki dlya avtomaticheskogo kontrolya i regulirovaniya temperatury posredstvom integrirovannoi sistemy Vijeo Citect 7.2 i programmnoi sredy dlya razrabotki i programmirovaniya PLK Schneider Electric Unity Pro 7.0 [Creation of a Laboratory Facility for Automatic Temperature Control and Regulation by Means of the Integrated Vijeo Citect 7.2 System and the Software Environment for the Development and Programming of Schneider Electric Unity Pro 7.0 PLC]. *Vestnik molodogo uchenogo UGNTU Vestnik molodogo uchenogo USPTU*, 2015, No. 3 (3), pp. 64-77.
- 4. Sovremennye promyshlennye sposoby polucheniya khlora i edkogo natra [Modern Industrial Methods for Producing Chlorine and Caustic Soda]. *Poluchenie khlora metodom elektroliza povarenoi soli*. Available at: https://works.doklad.ru/view/_8f59WsvPxs/all.html (accessed 23.08.2019). [in Russian].
- 5. Muravyova E.A., Bogdanov A.V. Software Implementation of the Accurate Regulators a Three-Dimensional Object: Heating Chamber Evaporator Heater Steam Boiler. *International Multi-Conference on Inductial Engineering and Modern Technologies*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8602917 (accessed 14.07.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602917.
- 6. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Bondarev A.V. Method for Increasing the Speed and Reducing the Error of Multidimensional Precise Logic Controller. *International Multi-Conference on Inductial Engineering and Modern Technologies*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8602643 (accessed 14.07.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602643.



- 7. Muravyova E.A., Uspenskaya N.N. Development of a Neural Network for a Boiler Unit Generating Water Vapour Control. Optical Memory and Neural Networks, 2018, Vol. 27, No. 4, pp. 297-307.
- 8. Muravyova E.A., Bondarev A.V., Sharipov M.I., Galiaskarova G.R., Kubryak A.I. Power Consumption Analysis of Pump Station Control Systems Based on Fuzzy Controllers with Discrete Terms in iThink Software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, Russian Federation, 2018, Vol. 327. (2). DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022072.

Сведения об авторах

About the authors

Муравьева Елена Александровна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы», УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Elena A. Muravyova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Automated Technology and Information Systems Department, USPTU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: muraveva_ea@mail.ru

Григорьева Тамара Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика, математика и физика», УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Tamara V. Grigorieva, Candidate of Pedagogical Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Computer Science, Mathematics and Physics Department, USPTU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: tamarag2012@mail.ru



Салихова Динара Рамилевна, студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», УГНТУ, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Dinara R. Salikhova, Student of Automated Technology and Informational Systems Department, USPTU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation e-mail: d.salihova@inbox.ru