

**МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ФТОРА****О.В. Егорова, Н.В. Ливенцова, С.Н. Ливенцов, Е.В. Ефремов, А.А. Денисевич (Томск)**

Для решения задач обучения, повышения и постоянной поддержки уровня знаний и навыков оперативного персонала производства фтора по управлению технологическим процессом (ТП) в штатном режиме и нештатных ситуациях разрабатывается компьютерный тренажер (КТ). Ключевым элементом КТ является тренажерная модель производства (ТМП), выполняющая функции имитации работы технологических установок и системы управления. Модель состоит из взаимосвязанных модулей имитации технологических процессов и системы управления, реализованных методом математического моделирования. Модуль имитации технологических процессов включает модели ТП электролизеров производства фтора, систем охлаждения, подачи фтористого водорода и электропитания серий электролизеров [1]. Данный материал посвящен разработке математической модели системы электропитания серий электролизеров производства фтора.

Рассматриваемая в данной работе система электропитания (СЭ) представляет собой электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных серий электролизеров, питаемую постоянным током посредством выпрямительного агрегата. Заданная производительность серий электролизеров обеспечивается либо регулированием силы тока в цепи, либо отключением нескольких аппаратов, что реализуется при непосредственном участии оператора АСУ ТП. Включение и отключение отдельных электролизеров осуществляется при помощи шунтирующих устройств, приводимых в действие дистанционно. Электролизеры установлены на электрических изоляторах, на всех трубопроводах смонтированы разъединители из непроводящего материала. Однако в ходе эксплуатации электролизеров отмечается нарушение их электрической изоляции, ведущее к появлению токов утечки. Последние являются причиной снижения тока через электролизеры и, как следствие, выхода фтора по току, а также способствуют усилению коррозии аппаратуры, трубопроводов и подземных коммуникаций [2]. При возникновении токов утечки наблюдается снижение потенциала по отношению к «земле» на одном из полюсов серий (так называемый «перекос» напряжения) [2], поэтому для контроля состояния изоляции электролизеров непрерывно производится измерение потенциалов корпусов электролизеров относительно «земли» (напряжений катод – «земля») по всем сериям. По диаграмме распределения напряжений катод – «земля» оператор судит о наличии утечек и принимает меры по их устранению (в частности, осуществляет снижение тока нагрузки на сериях до уменьшения перекоса напряжений до определенного значения и делает заявку дежурному электромонтеру на поиск и устранение места утечки).

Исходя из требований к создаваемому компьютерному тренажеру [1] и принципов функционирования СЭ сформулированы требования к модели системы, согласно которым модель должна: осуществлять расчет действительных значений токов и напряжений катод-земля для каждого электролизера серий в зависимости от изменения тока нагрузки, электрических сопротивлений электролизеров и сопротивлений их изоляции, а также при учете возможного шунтирования электролизеров; обеспечивать имитацию «перекоса» напряжения на сериях электролизеров вследствие возникновения токов утечки по причине нарушения электрической изоляции электролизеров; содержать инструменты инициирования нештатных ситуаций, связанных с нарушением электрической изоляции электролизеров, необходимые для формирования сценариев тренировок.

Динамика изменения значений токов и напряжений при подаче возмущений на СЭ практически не уловима для глаза наблюдателя. Динамические свойства объектов, анали-

зируемых человеком, через систему контроля и управления, по рекомендациям специалистов в области тренажеростроения [3,4], должны моделироваться в пределах возможностей восприятия человеком изменений инерционных свойств, поэтому для задач компьютерного тренинга ТП СЭ описан статической моделью.

Результаты поиска и анализа литературных источников (патентов, научных статей и отчетов), отраженные в [1], показали отсутствие разработок, связанных с математическим моделированием системы электропитания электролизного производства фтора. Найденные математические модели систем электропитания серий электролизеров производства алюминия [5, 6], близких по электрической схеме к рассматриваемой СЭ, разрабатывались с целью анализа состояния электрической изоляции серий. Модели позволяют рассчитывать токи через электролизеры и их потенциалы относительно земли, а также токи утечки. Однако в математическом описании данных моделей не учтено возможное шунтирование электролизеров и отсутствуют инструменты инициирования нештатных ситуаций, связанных с нарушением электрической изоляции электролизеров, что не удовлетворяет выше приведенным требованиям к модели СЭ производства фтора. Ввиду этого была поставлена задача разработки новой математической модели СЭ серий электролизеров производства фтора.

Математическое описание модели СЭ разрабатывалось с использованием методов расчета электрических цепей постоянного тока. По электрической схеме СЭ составлена расчетная схема, приведенная на рис. 1.

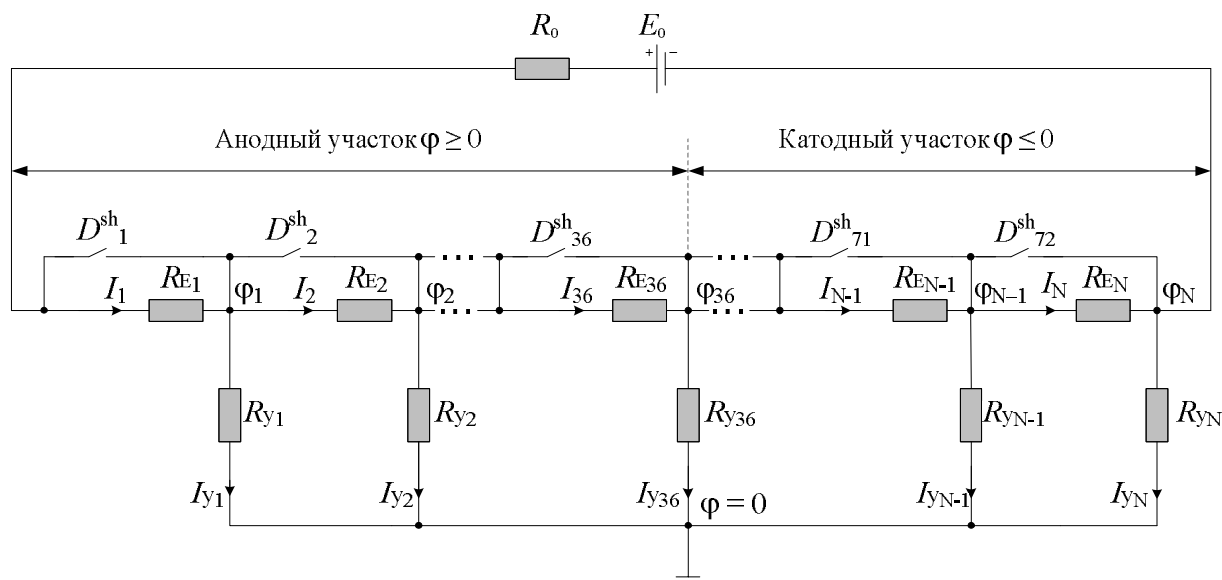


Рис. 1. Схема замещения электрической схемы СЭ серий электролизеров

Для описания процесса и на рис. 1 приняты следующие обозначения:  $R_0$  – внутреннее сопротивление, Ом, расчетного эквивалента выпрямительного агрегата;  $\varphi_i$  – потенциал  $i$ -го электролизера относительно «земли», В;  $I_{y_i}$  – ток утечки, протекающий по изоляции  $i$ -го электролизера, А;  $E_0$  – ЭДС расчетного эквивалента выпрямительного агрегата, В; электрические сопротивления электролизеров серий ( $R_{E_1}, R_{E_2}, \dots, R_{E_N}$ ), Ом; положения автоматов шунтирования электролизеров ( $D^{sh}_1, D^{sh}_2, \dots, D^{sh}_N$ ); выходных – действительные токи через электролизеры ( $I_{E_1}, I_{E_2}, \dots, I_{E_N}$ ), А; напряжения катод-«земля» электролизеров ( $U_{z_1}, U_{z_2}, \dots, U_{z_N}$ ), В; сопротивления изоляции электролизеров ( $R_{y_1}, R_{y_2}, \dots, R_{y_N}$ ), Ом, и признаки неполадок ( $Ke_1, Ke_2, \dots, Ke_N$ ), предназначенные для имитации нарушения электрической изоляции электролизеров, № – число электролизеров в сериях.

Из рис. 1 видно, что напряжение катод – «земля» для каждого  $i$ -го электролизера численно равно потенциалу этого электролизера относительно «земли»:

$$U_{Z_i} = \varphi_i \quad (1)$$

Для расчета потенциалов  $\varphi_i$  применим метод узловых потенциалов, основанный на первом законе Кирхгофа и законе Ома для электрических цепей постоянного тока.

В соответствии с методом узловых потенциалов для каждого  $i$ -го узла расчетной схемы (рис. 1) запишем соотношения для первого закона Кирхгофа с учетом возможного шунтирования электролизеров:

для 1-го узла:

$$I_1 - I_2 - I_{y1} = 0 \quad (2)$$

для  $i$ -го узла,  $1 < i < N$ :

$$I_i - I_{y_i} - I_{i+1} = 0 \quad (3)$$

для  $N$ -го узла:

$$I_N - I_{y_N} - I_1 = 0 \quad (4)$$

При этом токи в ветвях рассматриваемой схемы в случае, если электролизеры включены в работу, согласно закону Ома, можно определить по следующим соотношениям:

$$I_1 = \frac{(\varphi_N - \varphi_1) + E_0}{R_0 + R_{E_1}}, \dots, I_i = \frac{(\varphi_i - \varphi_{i-1})}{R_{E_i}}, \dots, I_N = \frac{(\varphi_{N-1} - \varphi_N)}{R_{E_N}}, \quad (5)$$

$$I_{y1} = \frac{\varphi_1}{R_{y1}}, \dots, I_{y_i} = \frac{\varphi_i}{R_{y_i}}, \dots, I_{y_N} = \frac{\varphi_N}{R_{y_N}}.$$

Подставляя соотношения (5) в (2)-(4) и приводя подобные, получаем систему уравнений для расчета значений потенциалов электролизеров, относительно «земли»:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 \left( \frac{1}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} + \frac{D^{sh}_2}{R_{E_2}} + \frac{1}{Ke_1 \cdot R_{y_1}} \right) - \frac{D^{sh}_2 \cdot \varphi_2}{R_{E_2}} - \frac{\varphi_N}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} = \frac{E_0}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} \\ \dots \\ - \frac{D^{sh}_i \cdot \varphi_{i-1}}{R_{E_i}} + \varphi_i \left( \frac{D^{sh}_i}{R_{E_i}} + \frac{D^{sh}_{i+1}}{R_{E_{i+1}}} + \frac{1}{Ke_i \cdot R_{y_i}} \right) - \frac{D^{sh}_{i+1} \cdot \varphi_{i+1}}{R_{E_{i+1}}} = 0, \text{ для } 1 < i < N \\ \dots \\ - \frac{\varphi_1}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} - \frac{D^{sh}_N \cdot \varphi_{N-1}}{R_{E_N}} + \varphi_N \left( \frac{1}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} + \frac{D^{sh}_N}{R_{E_N}} + \frac{1}{Ke_N \cdot R_{y_N}} \right) - \frac{E_0}{D^{sh}_1 \cdot R_{E_1} + R_0} \end{array} \right. \quad (6)$$

Для обеспечения возможности имитации нарушения электрической изоляции электролизеров в выражения проводимостей изоляции системы (6) внесены понижающие коэффициенты, названные признаками неполадок ( $Ke_1, Ke_2, \dots, Ke_N$ ). Значения признаков могут изменяться в интервале  $(0, 1]$ . При этом значение 1 соответствует штатной работе изоляции, все другие из указанного интервала – нештатной. При шунтировании электролизеров сопротивления шунтов в расчетной схеме принимаются равными нулю. В этом случае проводимости электролизеров должны быть обращены в ноль. Для этого в выражения проводимостей электролизеров системы (6) добавлены множители, соответствующие положениям автоматов шунтирования электролизеров ( $D^{sh}_1, D^{sh}_2, \dots, D^{sh}_N$ ), которые равны 0 в случае шунтирования и 1 в противном.

При этом потенциал  $i$ -го «зашунтированного» электролизера, кроме первого ( $i = 1$ ), в соответствии с принятой расчетной схемой становится равен потенциалу ближайшего слева незашунтированного электролизера:

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} \quad (7)$$

Для сохранения верности процедуры расчета, в случае шунтирования электролизеров, в системе (6) необходимо выполнить ряд преобразований: в соответствии с (7) устранить лишние уравнения и осуществить перерасчет коэффициентов, стоящих у потенциалов зашунтированных электролизеров.

Таким образом, разрешив систему (6) с учетом (7) и (1), получим значения напряжений катод-«земля» для каждого  $i$ -го электролизера.

Используя результаты решения системы (6), выражения (5) и принятые допущения о проводимостях зашунтированных электролизеров и их потенциалов, запишем выражения для расчета токов через электролизеры:

$$\begin{aligned} I_{E_1} &= \frac{D_1^{\text{sh}} \cdot (\varphi_{72} - \varphi_1) + E_0}{R_0 + R_{E_1}}, \\ &\dots \\ I_{E_i} &= \frac{D_i^{\text{sh}} \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1})}{R_{E_i}}, \\ &\dots \\ I_{E_N} &= \frac{D_N^{\text{sh}} \cdot (\varphi_{N-1} - \varphi_N)}{R_{E_N}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка адекватности имитации разработанной моделью штатного режима работы СЭ проводилась путем сравнения данных эксперимента на реальном производстве с результатами вычислительных экспериментов на модели. Производственные данные были получены в ходе пассивного эксперимента. Полученное значение взвешенного среднеквадратичного отклонения модельного распределения напряжений катод – «земля» от экспериментального находится в пределах ошибки измерения напряжений, что позволяет сделать вывод об адекватной имитации разработанной моделью работы СЭ. Проверка адекватности модели в нештатном режиме функционирования СЭ затруднительна в силу неизвестности действительной причины и ее величины, а также из-за ограниченного количества измеряемых переменных. Адекватность модели для КТ в таком случае оценивается экспертно на качественном уровне [7], то есть необходимым условием адекватности является принадлежность переменных модели заранее заданному диапазону и качественная аналогия их поведения. Оценка работоспособности модели в нештатном режиме путем визуального сравнения результатов вычислительного эксперимента с производственными данными также показала приемлемый результат.

Таким образом, разработана математическая модель системы электропитания серий электролизеров, позволяющая рассчитывать в статике изменения значений напряжений катод-«земля» и токов, протекающих через электролизеры, в зависимости от изменения тока «нагрузки» серий и сопротивлений электрической изоляции электролизеров. Математическое описание модели содержит специальные переменные: положения шунтирующих автоматов и признаки неполадок), обеспечивающие в процессе расчета модели возможность имитации включения-отключения отдельных электролизеров и изменения сопротивления их электрической изоляции. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали адекватную имитацию моделью штатных и нештатных режимов работы моделируемой СЭ, что позволяет сделать вывод о возможности использования ее в

---

компьютерном тренажере для обучения оперативного персонала промышленного производства технического фтора.

*Работа выполнена в Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Исследования выполнены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

### Литература

1. Разработка тренажерного комплекса электрохимического производства для подготовки оперативного персонала и инженеров в области автоматизации технологических процессов (промеж.) / ТПУ; рук. Ливенцова Н.В.; исполн.: Нагайцева О.В., [и др.]. – Томск, 2012. – 124 с. – Инв. № 02201257351.
2. **Галкин Н.П.** Технология фтора / Н.П. Галкин, А.Б. Крутиков. – М.: Атомиздат, 1968. – 188 с.
3. **Музыка Л.П.** Проблемы и научно-технические принципы современного компьютерного моделирования технологических объектов для тренажеров оперативного персонала / Л.П. Музыка, С.И. Магид, Е.Н. Архипова // Надежность и безопасность энергетики. – 2009. – №1. – С. 27–35.
4. **Багрова Н.Д.** Фактор времени в восприятии человеком. – Л.: Наука, 1980. – 96 с.
5. **Иванов С.В.** Оценка показателей качества состояния изоляции серии электролизеров алюминия // Цветные металлы Сибири: сборник науч. ст., 2009. – Раздел II. – С. 201–203.
6. **Макаров А.М.** Влияние количественных и качественных характеристик технологического тока на процесс электролиза алюминия: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. – ИГТУ, 2006. – 141 с.
7. **Дозорцев В.М.** Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. – М.: СИНТЕГ, 2009. – 372 с.