

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ
АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ****И.А.Карлов***

Рассматривается построение классификационной модели, разделяющей алюминиевые электролизеры на два класса по сроку службы на основании статистической информации об их работе. Исследование построенных моделей дает возможность идентифицировать электролизеры, вышедшие из строя по причине нарушений в процессе эксплуатации.

Одним из важнейших показателей, характеризующих технический уровень производства алюминия, является срок службы электролизеров. На отечественных заводах, использующих технологию электролиза с самообжигающимися анодами, всегда имеются электролизеры с большим разбросом срока службы. Капитальный ремонт электролизеров требует больших расходов, поэтому увеличение срока их службы – один из путей повышения рентабельности действующего алюминиевого производства.

Традиционно для получения информации о причинах преждевременного выхода ванны из строя производят детальное изучение состояния отработанного катодного устройства.

Основные факторы, оказывающие влияние на срок службы электролизеров, можно разделить на три группы:

- нарушения в процессе сборки электролизера;
- нарушения в процессе пуска;
- нарушения в процессе эксплуатации.

Факторы, относящиеся к первой группе, на данный момент достаточно изучены. Факторы, относящиеся ко второй, а в особенности к третьей группам, изучены мало. Для детального исследования влияния этих факторов на срок службы электролизера необходимо разработать методику изучения особенностей технологического процесса на отдельных электролизных ваннах.

Для исследований, связанных с изучением электролизеров в процессе эксплуатации, мы использовали базы данных АСУТП, представляющих собой выборку среднесуточных значений технологических параметров для каждого электролизера.

Нашу задачу можно сформулировать следующим образом: разработать систему, которая на основании статистических данных о работе каждого электролизера сможет выявить из общей совокупности электролизных ванн те, которые выйдут из строя раньше положенного срока. Таким образом, поставленная задача представляет собой задачу классификации с двумя классами: первый класс – работающие электролизеры, второй – электролизеры, досрочно вышедшие из строя.

Существует два вида классификации: классификация с учителем и классификация без учителя.

Классификация с учителем применяется в том случае, когда имеется некоторый набор из совокупности исследуемых объектов, для которого известна классовая принадлежность каждого объекта.

Классификация без учителя применяется в случае, когда нет точной информации о классовой принадлежности объектов. Разделение в данном случае происходит на основании результатов сравнения объектов между собой.

Поставленная нами задача относится к задачам классификации без учителя, поскольку у нас нет достоверной информации о принадлежности электролизеров к определенному классу. Электролизеры, которые вышли из строя к моменту исследования, безусловно, относятся ко второму классу, однако работающие на момент исследований электролизеры нельзя однозначно отнести к первому классу. Дело в том, что каждый из них может проработать до конца положенного срока (и тем самым действительно быть электролизером первого класса), а может выйти из строя через некоторое время (тогда он должен быть отнесен ко второму классу).

Для решения задачи классификации использовался метод классификации без учителя, разработанный автором и описанный в [1].

Основные идеи метода:

1. Для каждого объекта строим характеристическую функцию, аппроксимирующую некоторые связи между параметрами.
2. Классифицируем построенные функции, используя аппарат функционального анализа.

В качестве исходных экспериментальных данных взяты результаты измерений 14 технологических параметров на серии из 25 электролизеров четырех корпусов одного цеха Красноярского алюминиевого завода в период начиная с запуска электролизера и заканчивая либо датой отключения (для отключенных электролизеров), либо 31 декабря 2002 года. Все электролизеры принадлежат к одному типу и пущены в один год.

* © И.А. Карлов, 2004; Красноярский госуниверситет (Россия); E-mail: ikarlov@mail.ru

Из 25 электролизеров на 1 сентября 2003 года 10 были отключены для ремонта и 15 продолжали работу. Период работы, исследуемый нами для разных электролизеров, варьировал в пределах от 23 до 35,7 месяцев, т.е. базы данных содержали от 700 до 1085 записей. Каждая база данных содержала результаты изменений следующих технологических параметров: криолитовое отношение (среднее), напряжение анода (среднее, В), напряжение электролизера (среднее, В), температура (среднее, С), уровень металла (среднее, см), уровень шума (среднее, В), уровень электролита (среднее, см), количество АЭ (среднее, шт.), напряжение АЭ (среднее, В), длительность АЭ (среднее, мин), заданное напряжение (среднее, В), содержание CaF_2 (%), средняя сила тока (АСУТП) (кА), средняя сила тока (сводка) (кА).

В качестве рабочего параметра для построения классификационной модели был выбран технологический параметр «Криолитовое отношение».

Выбор оптимального набора входных параметров

Вычисление попарных коэффициентов корреляции позволило выявить два сильносвязанных параметра: «Средняя сила тока (АСУТП)» и «Средняя сила тока (сводка)» (коэффициент корреляции 0,852005). Из дальнейшего исследования был исключен параметр «Средняя сила тока (АСУТП)».

Для всех остальных пар технологических параметров значение коэффициента корреляции по модулю не превышало 0,4.

Далее была построена нейросеть, которая вычисляла значения параметра «Криолитовое отношение», используя значения других параметров.

Была составлена обучающая выборка из 1333 элементов. 600 из них в дальнейшем было задействовано в обучении, 733 - в тестировании качества работы нейросетевого аппроксиматора.

Для аппроксимации была построена двухслойная нейросеть, 24 нейрона в первом слое, 6 – во втором, точность расчетов 0,1 (11%). Для полного обучения потребовалось 135 тактов. Результаты тестирования:

Правильно решенных примеров: 612 (83,4925%).

Средняя ошибка: 0,04096325 (9,1%).

Значимость компонентов входного вектора приведена на рис. 1.

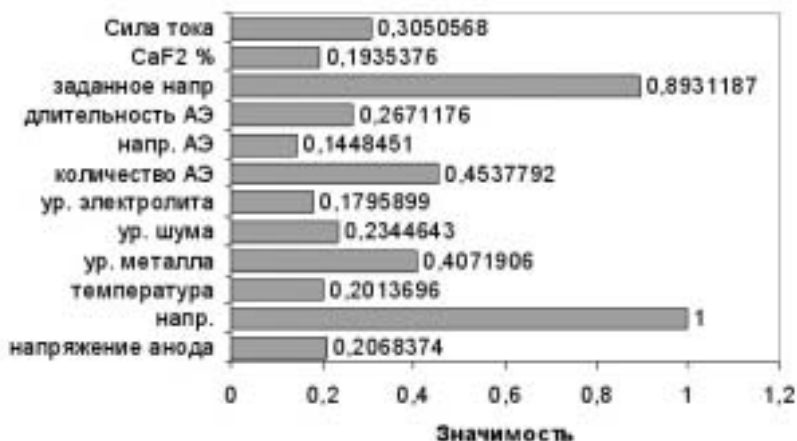


Рис. 1. Значимость входных параметров

Как видно из диаграммы, наименьший вес имеют компоненты *напряжение АЭ, процентное содержание CaF_2 , уровень электролита, температура*. Мы исключили их из модели и заново обучили нейросеть. Результаты тестирования сети после удаления из нее четырех компонент:

Правильно решенных примеров: 613 (83,62892%).

Средняя ошибка: 0,04735221 (10,52 %).

Все компоненты, согласно диаграмме на рис.2, имеют высокие показатели значимости. Удаление любого из них ведет к падению качества аппроксимации (почти на 10% уменьшается количество правильно решенных примеров из тестовой выборки).

В результате входной вектор состоит из следующих компонент: *напряжение анода (среднее, В), напряжение электролизера (среднее, В), уровень металла (среднее, см), уровень шума (среднее, В), количество АЭ (среднее, шт.), длительность АЭ (среднее, мин), заданное напряжение (среднее, В), средняя сила тока (сводка) (кА)*.

Для создания классификационной модели для каждого объекта-электролизера необходимо построить нейросети, вычисляющие один из параметров (в случае нашей задачи «Криолитовое отношение») по другим параметрам.

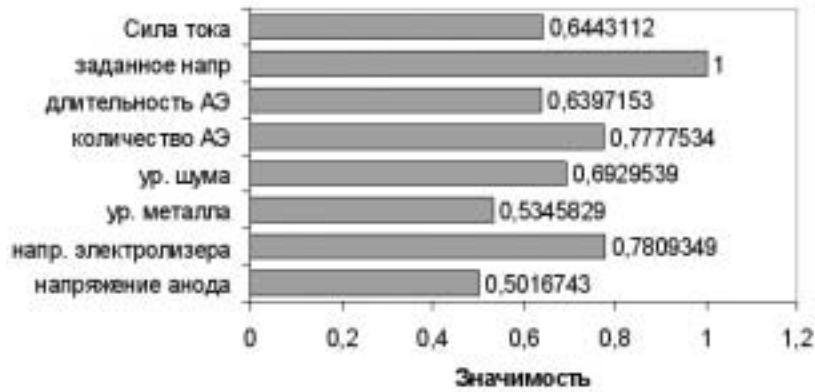


Рис. 2. Значимость входных параметров

Было построено 25 нейросетей (по одной для каждого электролизера). Результаты тестирования показали, что количество правильно решенных примеров тестовой выборки (разница между полученным и фактическим значением функции в точке меньше заданной погрешности) не ниже 78%, для подавляющего большинства (22 из 25) за 80%.

Была проведена классификация электролизеров на два класса.

Результаты классификации на два класса приведены на диаграмме (рис. 3). По вертикальной оси отложено расстояние до ядра соответствующего класса.

Проведем интерпретацию результатов классификации. Электролизеры №1, №2, №4, №8, №9, №12, №13, №14, №17, №18, №19, №21, №24, №25 принадлежат к классу 1 (расстояние до ядра класса 1 меньше чем до ядра класса 2), остальные – к классу 2. Сравнив полученные результаты с фактическим разбиением на классы, мы интерпретировали класс 1 как класс рабочих электролизеров, а класс 2 – как класс электролизеров с малым сроком службы.

Построенная классификационная модель совпала с фактическим разбиением на классы для 22 из 25 электролизеров.

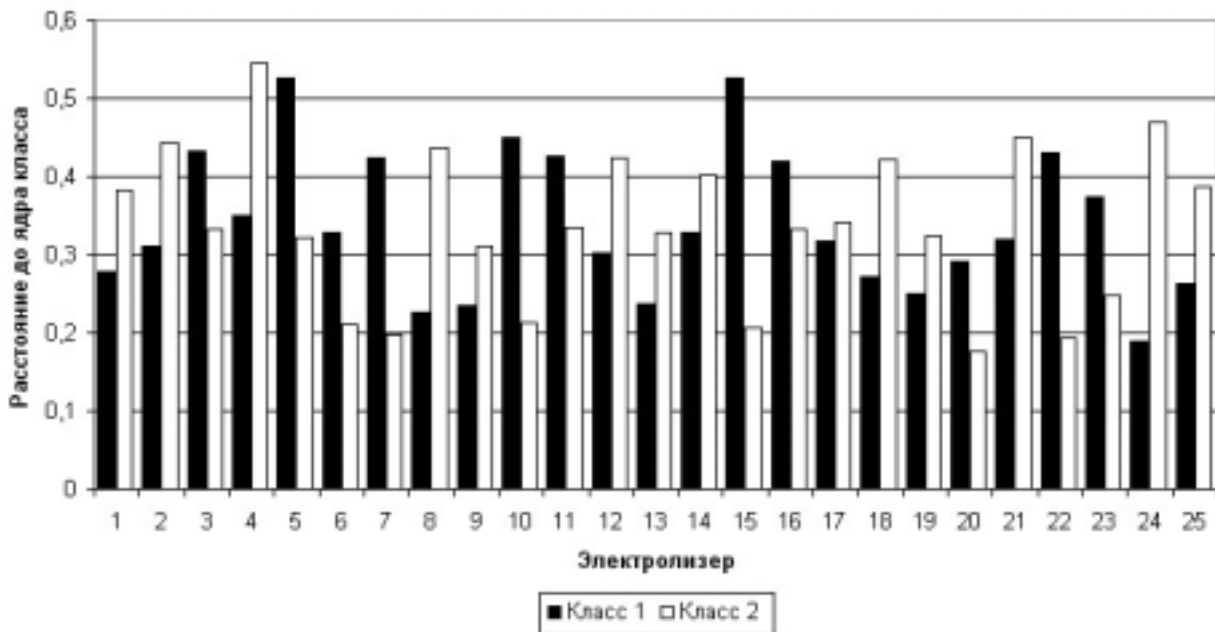


Рис. 3. Результаты классификации

В дальнейших исследованиях построенное ядро класса рабочих электролизеров будем называть «типично хорошим» электролизером.

Сравнение электролизеров с различным сроком службы

Цель дальнейших исследований - определение электролизеров, вышедших из строя по причине изменений, произошедших во время эксплуатации на основании $\rho(t)$ -изменения во времени расстояния до ядра класса рабочих электролизеров для каждой электролизной ванны из исследуемой совокупности.

Сравнение каждой электролизной ванны с типично хорошей происходило следующим образом.

1. Сначала строится нейросеть – аппроксимационная модель параметра «криолитовое отношение» на выборке, содержащей результаты измерений технологических параметров за первые 10 месяцев работы электролизера, начиная с 22-го дня после запуска.

2. Для построенной нейросети вычисляется расстояние ρ по формуле

$$\rho(f, g) = \|f - g\| = \left\{ \int_{E_{n-1}} (f(\bar{x}) - g(\bar{x}))^2 dx \right\}^{\frac{1}{2}}$$

до ядра класса рабочих электролизеров – «типично хорошего» электролизера.

3. К обучающей выборке добавляем результаты измерений технологических параметров за следующие 2 месяца.

Повторяем шаги 2-3 до тех пор, пока исследуемый объем выборки станет меньше объема всей выборки, имеющейся в нашем распоряжении.

Таким образом, для каждого электролизера был построен график функции $\rho_i(t)$ - изменения расстояния до ядра класса рабочих электролизеров с шагом в 2 месяца, i – номер электролизера.

Наиболее типичный график $\rho_i(t)$ для рабочих и для 7 из 10 отключенных электролизеров приведен на рис.4.

Анализируя график на рис.4, можно сказать, что для функции $\rho_i(t)$ разброс значений не превышает 0,1, что соответствует относительно постоянному значению расстояния до ядра класса рабочих электролизеров, и, как следствие, с большой вероятностью можно предположить, что существенных изменений, повлиявших на выход из строя электролизных ванн, в процессе эксплуатации не было.

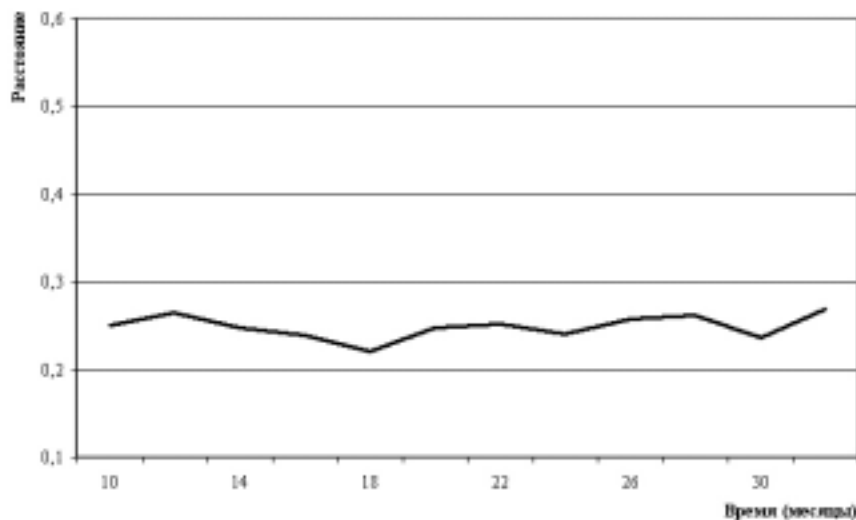


Рис. 4. Изменение $\rho_i(t)$

Однако для трех электролизеров, принадлежащих к классу вышедших из строя, наблюдалась совсем иная картина.

На рис. 5-7 очень хорошо виден скачок – резкое возрастание расстояния до ядра «типично хороших». Увеличение расстояния для электролизера № 3 происходит на отрезке с 16 по 20 месяцы эксплуатации, для электролизера № 16 – с 10 по 14, для электролизера № 23 – с 12 по 16 месяцы.

Это может означать, что, скорее всего, в этот период произошли какие-то изменения, которые привели к раннему отключению электролизера.

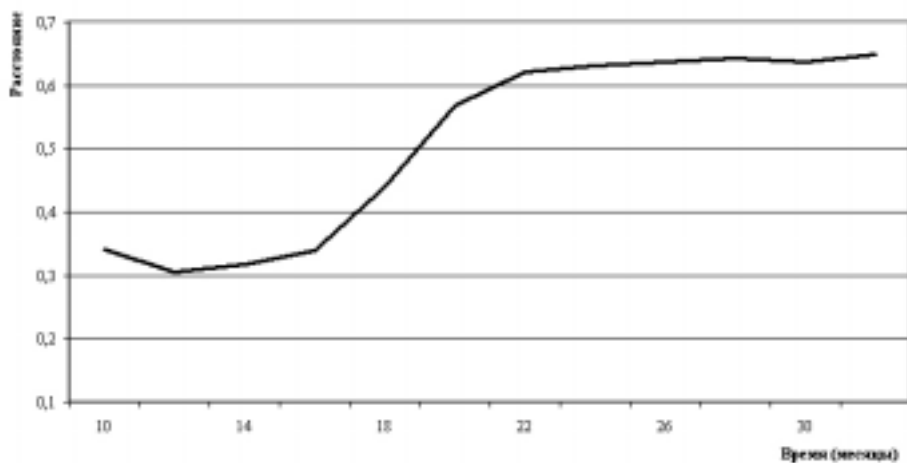


Рис. 5. Изменение $\rho_i(t)$ для электролизера №3

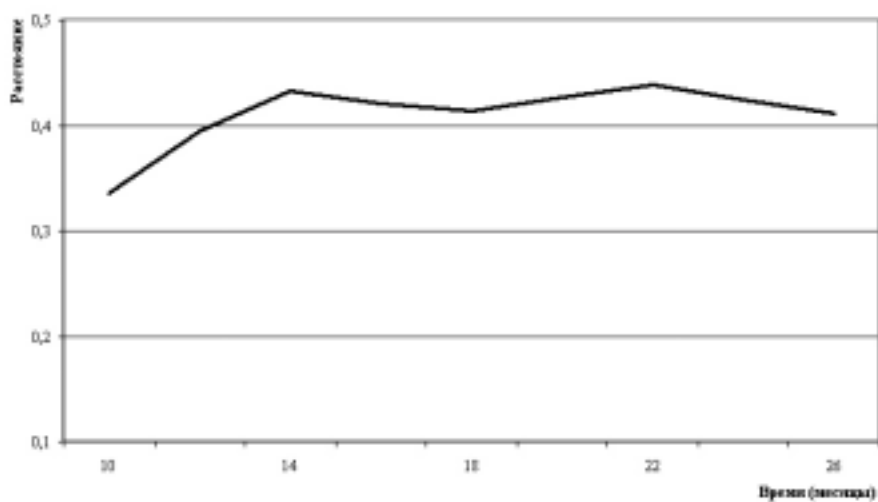


Рис. 6. Изменение $\rho_i(t)$ для электролизера №16

Изменение $\rho_i(t)$ для электролизера №23

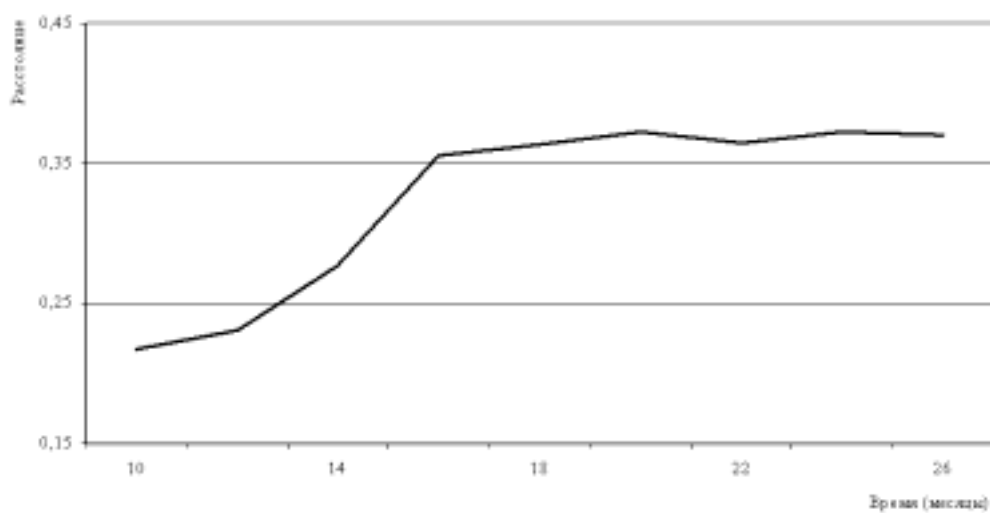


Рис. 7. Изменение $\rho_i(t)$ для электролизера №23

Исследование статистических показателей электролизных ванн

После определения временных отрезков резкого возрастания расстояния до «типично хорошего» электролизера встал вопрос о причинах этого возрастания, т.е. о выявлении изменений, произошедших в электролизерах №3, №16, №23 в соответствующих временных отрезках. Для этого мы рассмотрим изменение во времени (также с шагом 2 месяца) различных статистических величин, таких как среднее выборочное, среднеквадратичное отклонение, коэффициенты корреляции между параметром «Криолитовое отношение» и другими параметрами.

1. Для каждого электролизера построены функции $M_i(t)$ и $D_i(t)$, характеризующие изменение во времени среднего выборочного и среднеквадратичного отклонения i параметра соответственно.

В процессе исследования построенных функции $M_i(t)$ и $D_i(t)$ не были обнаружены существенные отличия между электролизерами.

2. Для каждого электролизера построим функции $K_{ij}(t)$ - изменение во времени коэффициента корреляции между i и j параметром.

В результате исследования графиков изменения коэффициента корреляции между параметрами «криолитовое отношение» и «Заданное напряжение» и между параметрами «Криолитовое отношение» и «Уровень металла» получены следующие результаты.

Для всех 15 рабочих и 7 вышедших из строя электролизеров графики имели схожую структуру. Разброс значений функций $K_{ij}(t)$ не превышал 0,2, изменение коэффициентов корреляции происходит равномерно, графики не содержат ярко выраженных минимумов и максимумов.

Графики изменения коэффициентов корреляции этих двух пар технологических параметров электролизеров №3, №16, №23 содержат отрезки, на которых значение коэффициента корреляции претерпевает существенные изменения.

На рис. 8 приведен график для электролизера №3. Коэффициенты корреляции до определенного периода изменяются равномерно, однако, начиная с 18-го месяца, происходит существенный всплеск значений коэффициента корреляции (падение значения коэффициента корреляции между «Криолитовым отношением» и «Заданным напряжением» и падение по модулю значения коэффициента корреляции между «Криолитовым отношением» и «Уровнем металла»). Потом все возвращается к равномерному изменению. Примечательен тот факт, что период этого всплеска совпадает с периодом резкого возрастания расстояния до «типично хорошего» электролизера.

Для электролизера №16 наблюдается аналогичная картина. Всплеск приходится на 7-13-е месяцы работы электролизера (возрастание значения коэффициента корреляции между «Криолитовым отношением» и «Заданным напряжением» и возрастание по модулю значения коэффициента корреляции между «Криолитовым отношением» и «Уровнем металла»). Эти сроки также совпадают с периодом резкого возрастания расстояния до «типично хорошего» электролизера.

Для электролизера №23 всплеск приходится на 11-16-е месяцы работы электролизера, резкое возрастание расстояния до «типично хорошего» электролизера – на 12-17-е месяцы эксплуатации.

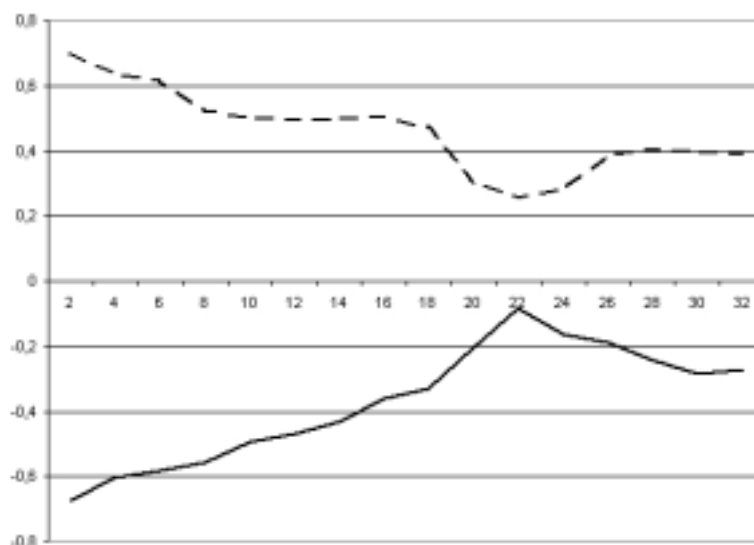


Рис. 8. График для электролизера № 13:

--- коэффициент корреляции между «Криолитовым отношением» и «Заданным напряжением»;
 — коэффициент корреляции между «Криолитовым отношением» и «Уровнем металла»

Можно сделать следующие выводы:

1. Временные отрезки изменения коэффициента корреляции практически совпадают с временными отрезками возрастания $\rho_i(t)$. Это может говорить о том, что переход электролизеров из класса рабочих электролизеров в класс электролизеров с ранним выходом из строя происходил в момент, когда существенно изменялась зависимость параметра «КО» от «заданного напряжения» и «уровня металла».
2. Эти изменения могли быть вызваны перераспределением сил внутри ванны, но, скорее, вмешательством внешних факторов (поскольку коэффициенты корреляции между другими параметрами в эти отрезки времени не претерпели существенных изменений).

Автор благодарит ОАО «ИТЦ» и Т.В. Пискажову за помощь, оказанную при постановке задачи и интерпретации результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлов И.А. Метод классификации без учителя для объектов, характеризуемых выборкой состояний / И.А. Карлов // Компьютерное моделирование 2003: Труды Международной научно-технической конференции. - СПб: Нестор, 2003. - С.146-150.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
3. Абусев Р.А. Групповая классификация. Решающие правила и их характеристики / Р.А. Абусев. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. – 219 с.
4. Горбань А.Н. Нейроинформатика / А.Н.Горбань и др. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
5. Надточий А.М. Технологии капитального ремонта электролизеров / А.М.Надточий, В.А.Сергеев, А.А.Бахтин // Цветные металлы. – 2002. – Спец. выпуск. – С. 24-28.

MATHEMATICAL MODELS FOR RESEARCH OF WORKING PERIOD OF THE ELECTROLITIC BATH

I.A.Karlov

It is consider the creation of the classification model divided the set of electrolytic baths into two classes: working electrolizers and broken elecrolizers. That model is based on the statistic about electrolizer's work. Research of this model give us a possibility to identify broken elecrolitic baths? Which broke because there are some breaches of the tchnological process.