Объекты с неоднородными характеристиками имеют место в производстве электронных и радиотехнических изделий. К ним относятся процессы *травления* и *формовки анодной алюминиевой фольги* для электролитических конденсаторов. Каждый из этих технологических процессов образует подгруппу объектов, имеющих одинаковую физическую природу, один и тот же подвергаемый изменению, исходный материал – анодную алюминиевую фольгу.

Травлению подвергается предварительно крацованная фольга для увеличения интегральной поверхности в результате электрохимической динамической обработки в растворе поваренной соли. Прошедшая травление фольга промывается в водопроводной воде, очищается в дихлораторе и сушится. Качество фольги оценивается коэффициентом травления *kтр*. Структура поверхности фольги, зависящая от обработки при прокатке и отжиге, существенно влияет на качество травления. Неоднородность исходной структуры алюминиевой фольги влечёт за собой различную восприимчивость к травлению. Поэтому при травлении фольги получается неоднородная по структуре поверхность не только для одного рулона, но и между рулонами при одних и тех же значениях технологических параметров. Т.к. в ванне травления имеет место неоднородность температурных электрических полей, то после травления структура неоднородна и по ширине ленты фольги, что в свою очередь, приводит к неравномерной её отмывке от ионов хлора, которые влияют на последующую формовку. Кроме того, травление фольги производится для высоковольтных и низковольтных анодов.

Т.о. как показывает анализ, процесс травления алюминиевой фольги характеризуется рядом неоднородностей:

* по структуре фольги при поступлении на агрегат травления (производственная неоднородность неуправляемых входных переменных);
* физическим полем в ванне травления (конструкционная неоднородность неуправляемых входных переменных);
* статистическими и динамическими характеристиками при травлении фольги для анодов, формируемых на низкие и высокие напряжения
* неоднородностью, обусловленной различием связи в статике и динамике, в зависимости от диапазонов управления;

На первом этапе исследования были выделены два ряда объектов (*l* = 2): агрегаты травления для анодов формируемых на:

*– низкие напряжения;*

*– высокие напряжения.*

Анодная *Al* фольга после травления имеет неодинаковые значения коэффициентов травления как вдоль рулона и по ширине ленты фольги, так и от рулона к рулону, и поэтому образование оксидного слоя в результате электрохимического процесса формовки протекает с неодинаковой скоростью.

С изменением коэффициента травления *kтр*, коэффициент передачи по удельной ёмкости фольги не остаётся постоянным и зависит от напряжения формовки. Это в первую очередь объясняется тем, что электрическая ёмкость фольги в большой степени определяется не толщиной оксидной плёнки, а предварительно развитой поверхностью при травлении и структурной поверхности фольги. *Al* фольга, поступающая на формовку, также обладает различной восприимчивостью к образованию оксидной плёнки в зависимости от режимов предшествующего процесса травления, от уровня загрязнения поверхности фольги ионами *Cl* и наличия дефектов *Al* фольги.

При формовке анодной *Al* фольги её обработка складывается из времени образования оксидной плёнки τ*о*и её закрепления τ*з*. За время τ*о* ёмкость фольги достигает заданной величины *Cуд*, а время закрепления τ*з* оксидной плёнки определяет качество заформованной фольги по уровню тока утечки *Iут*, который она имеет в зависимости от ёмкости. При уменьшении времени τ*з* ток утечки возрастает, при хранении фольги может достигнуть значения выше допустимого. И тот и другой этапы формовки определяют качество заформованной фольги, и существенно влияют на её выходные параметры. Поэтому весь процесс формовки разделяется на этап коррекции удельной ёмкости от начального её значения, определяемого толщиной естественной оксидной плёнки, до заданного значения и этап стабилизации, на котором происходит закрепление образованной при формовке оксидной плёнки.

Кроме того, при формовке имеют место старение, появление осадков, накопление оксида *Al*, что влияет на скорость образования оксидной плёнки и приводит к изменению во времени характеристик агрегатов формовки. Источниками неоднородностей при формовке анодной фольги являются различие агрегатов по конструкции, формовочному напряжению, исходным материалам, а так же наличие неоднородных физических полей, различие в оценке качества ведения процесса и его многоэтапность. На первом этапе исследования было выделено две подгруппы агрегатов формовки, каждая из которых содержит два ряда объектов (высоковольтные и низковольтные).

**Задача**

Требуется получить математическое описание процесса формовки анодной *Al* фольги для электролитических конденсаторов по току утечки *Iут* для высоковольтного агрегата типа II.

травление электролитический конденсатор алюминиевый

**Решение**

Так как степень неоднородности α*нор* = 0,89 оказалась > α*нокр* = 0,84, то неоднородность внутри рядов агрегатов является существенной, что требует учёта неоднородностей при моделировании процесса формовки путём декомпозиции математического описания по однородным компонентам.

После составления полного перечня входных переменных методом априорного ранжирования были выделены входные переменные существенно влияющие на ток утечки: присутствие ионов *Cl* на поверхности фольги после травления *kх*, температура формовочного электролита *t°ф*, скорость протяжки фольги через ванну формовки *Vпр*, напряжение формовки *Uф*, удельное электрическое сопротивление электролита *p* и концентрация борной кислоты *k*. К группе других входных переменных (накопление оксида алюминия, коэффициент травления *kтр* и кислотность электролита *pH*) были отнесены переменные, оказывающие более слабое влияние на ток утечки заформованной фольги *Iут*.

Для построения математической модели процесса формовки по току утечки *Iут* был поставлен пассивный эксперимент, т. к. гипотеза о нормальном распределении выходной переменной подтвердилась, но не всеми из сильно влияющими входных переменных возможно варьировать на верхнем и нижнем уровнях по плану активного эксперимента (удельное электрическое сопротивление электролита *p* и концентрация борной кислоты *k*).

Вначале план эксперимента был реализован без учёта качественных неуправляемых входных переменных при общем времени наблюдения *Т* = 1030 мин, объёма выборки *N* = 150 и интервала съёма данных *Δt* = 7 мин.

Для получения математической модели в процессе формовки по току утечки для высоковольтного одноступенчатого агрегата коэффициент множественной корреляции составил *kм*= 0,5938. Следовательно, при построении модели по току утечки необходимо учитывать неоднородности качественных неуправляемых входных переменных, т.е. методами дисперсионного анализа требуется оценить и выделить однородные компоненты по качественным производственным неуправляемым входным переменным.

Дисперсионный анализ показал, что существенное влияние на ток утечки оказывает качественный вектор *Вф*, зависящий от наличия дефектов как в исходном материале, так и в сформированном оксидном слое, с которым связано влияние неоднородностей, не учтённых при построении модели по току утечки. Поэтому фольга была разделена на три группы (*k*=1–3).

С учётом неоднородности качественных неуправляемых входных переменных уравнения статики процесса формовки по току утечки для высоковольтного агрегата имеют следующий вид:

76,32 – 0,07 *t°ф* – 61,58 *kx*-0.6533 *τф*+ 1,2 *τфkx*

55.02 – 0,099 *t°ф* – 63,33 *kx* – 0.11 *τф*+ 1,27 *τфkx*

150,75 – 0,095 *t°ф* – 42,99 *kx*-0.495 *τф*+ 0,9 *τфkx*

где

*τф -* время формовки фольги, введенное в уравнение статистики в качестве переменной;

*l* – номер ряда агрегатов;

*k* – условие неоднородности оцениваемое по фактору *Вф*(*k* = 1–3)

Для этих математических моделей однородных компонент коэффициенты множественной корреляции соответственно равны *RН 1*= 0,887, *RН2* = 0,92, *RН3* = 0,87, что значительно выше критических значений (говорит о том, что все неоднородности учтены).

Декомпозиция математического описания по результатам активного эксперимента

Она осуществляется по управляющим воздействиям . В этом случае разделение условий на группы производится путём выделения однородных диапазонов технологического режима по всем  одновременно.

Процедура декомпозиции математического описания заключается в получении моделей диапазонов, между которых имеется существенное различие по структуре, по набору управляющих воздействий и содержит следующие этапы:

1. Методами отсеивающего эксперимента определяются наиболее информативные выходные переменные , для каждой из них выделяются существенные входные переменные и формируется связь между ними:

*yi=f (U1, …, Un)*, 

где  – вектор управляющих воздействий для *i*-й переменной.

2. Устанавливаются верхний и нижний пределы изменения управляющих воздействий, исходя из физических ограничений для исследуемого технологического процесса.

3. Выбираются исходная точка при движении от нижнего предела изменения управляющих воздействий и разрабатывается план активного эксперимента

, , 

где *N* – число опытов при постановке эксперимента, а вектор управляющих воздействий в исходном состоянии *Uj0 = {U10, …, Un0}*

4. В результате реализации плана эксперимента Х при изменении управляющих воздействий на величину шага варьирования *ΔUj* получают вектор экспериментальных значений выходной переменной



5. По выборке экспериментальных значений осуществляется построение математической модели в виде уравнения регрессии

,

производится оценка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии  по результатам эксперимента с помощью критерия Стьюдента и адекватность математической модели по F-критерию Фишера.

6. Если гипотеза об адекватности модели подтверждается, то реализуются «мысленные опыты» в некоторых точках  факторного пространства в направлении  по , полученному при реализации плана эксперимента Х, для чего:

а) вычисляют произведения , где *ΔUj*–шаг варьирования фактора при построении модели, и принимается за базовый тот фактор, для которого это произведение наибольшее:



б) устанавливается новый шаг варьирования для базового фактора λδ и рассматриваются соответствующие значения λj по остальным переменным



7. При реализации «мысленных опытов» определяются предсказания выходной переменной *iпрk* в точках *k* в направлении , которые через два-три шага «мысленных опытов» сравниваются с экспериментальными значениями *yiэk*:

*iэk -iпрk = |(iпр(k+1) +(iпр1-β0)| ≤ Δyiдоп*

где *iэk* – усреднённое значение переменой *yi* по результатом параллельных опытов в точке k факторного пространства;

*yiдоп* – допустимая погрешность аппроксимации.

8. На границе адекватности модели *Ujгр* при *iэk -iпрk > Δyiдоп*

выбирается новый уровень, реализуется план активного эксперимента и снова проводятся «мысленные опыты» в соответствии с новым базовым фактором и соответствующими шагами варьирования при движении от *Ujгр* в направлении к  полученному по новому плану эксперимента *Х*, и так далее до верхнего предела управляющих переменных

*Uiгр = Ujmax*  по п.п. 3–7.

В результате исследования получают *p* математических моделей однородных компонент по диапазонам технологического процесса

*yi=fi(P)(U)*

(*p* – число однородных диапазонов).

Если на оcнове априорной информации на предварительном этапе исследования технологических процессов удаётся выделить однородные компоненты по всем видам неоднородностей, то задача декомпозиции математического описания упрощается и сводится к построению моделей по каждой однородной компоненте, используя результаты активного или пассивного эксперимента.