

ПРОБЛЕМЫ РЕСТАВРАЦИИ ЭВП В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

В последние годы в России резко возрос интерес к проблемам реставрации сложных изделий вакуумной электроники. Это обусловлено, во-первых, нарастающим дефицитом данных приборов – производство изделий электронной техники на предприятиях России за последние 10 лет сократилось более чем в 30 раз. Кроме того, ряд производителей бывшего СССР ныне оказались за рубежом и поставляют России электровакуумные приборы (ЭВП) по явно завышенным, монопольным ценам. Производить же их в России нецелесообразно либо из-за несоответствия затрат на освоение и сравнительно ограниченного внутреннего спроса, либо по причине их морального устаревания – появились более современные ЭВП. Таким образом, все чаще поднимается вопрос о реставрации отказавших или уже отслуживших свой срок службы изделий.

ТРИ НАПРАВЛЕНИЯ РЕСТАВРАЦИИ ЭВП

Для ЭВП крайне важна последовательность технологических операций – а их может быть несколько сотен. Поэтому при реставрации прибора со вскрытием оболочки и заменой хотя бы одного элемента приходится расходовать более двух третей затрат от изготовления исходного прибора (см. табл. 1, пп. 2–5). Но эти расходы могут оказаться гораздо выше, если учесть, что исходный прибор производится серийно, а реставрируемый – индивидуально и для него велика доля ручных операций.

При такой раскладке операций сразу напрашивается **первое направление** реставрации, аналогичное принятому в машиностроении, – разобрать все до винтиков, почистить и собрать снова по технологии, присущей прибору до его ремонта. При этом совершенно не обязательно использовать детали исходного прибора, допустима их замена на заново изготовленные. Данное направление пригодно для сравнительно простых приборов, выпускаемых крупными сериями. Главный выигрыш заключается в использовании уже готовых деталей и материалов.

А.Бакуменко,
А.Киселев,
А.Соколов

Второе направление принципиально иное. Его суть в том, что прибор вскрывают по одному из швов, заменяют вышедший из строя узел (чаще всего – катодный), внутренние поверхности, насколько это возможно, очищают от загрязнения. Затем прибор вновь объединяют по разъединяющему шву, устанавливают на откатной пост, обрабатывают по скорректированным вакуумно-термическим и токовым режимам, учитывающим факт вскрытия, спаивают и тренируют. Такой подход экономит средства на разборку прибора до деталей и новую сборку, но требует затрат квалифицированного, часто – интеллектуального труда на составление плана действий и корректировку режимов. Подобные работы под силу только крупному предприятию с высококвалифицированными кадрами и набором современных технологий. Каждый акт реставрации превращается в исследовательскую работу с заманчивыми возможностями вносить изменения в конструкцию прибора.

Однако данное направление экономически целесообразно, если:

- реставрируемый прибор – штучного производства. Такие ЭВП – особо ценные, часто они уникальны и, как правило, крупногабаритны;
- ЭВП вообще недоступен для покупки, например очень давнего выпуска или из зарубежья, откуда его достать нельзя;
- затраты на реставрацию компенсируются выгодой при эксплуатации реставрированного прибора;
- в технологической цепочке реставрации можно сократить какие-либо операции, например не проводить некоторые испытания по ТУ, доказав, что в них нет необходимости;
- после реставрации улучшаются параметры ЭВП по сравнению с исходным прибором, например частотный диапазон, устойчивость к циклическим нагрузкам, долговечность. Практически это

Таблица 1. Вклад отдельных операций в себестоимость ЭВП на примере магнетрона средней мощности

№ п/п	Операции	Вклад в себестоимость, %
1	Изготовление деталей и узлов	36
	в том числе катодного узла	5
	сборка прибора из узлов	10
2	Термовакuumная обработка	25
3	Герметизация	1
4	Тренировка	20
5	Испытания на соответствие ТУ	18



означает создание прибора нового типа, если таковой еще не выпускается серийно;

- если возможность реставрации (ремонта) заранее предусмотрена при конструировании прибора. Например, в крупногабаритных приборах катодная ножка соединяется с изолятором сваркой по наружным диаметрам фланцев, выступающих за пределы ножки. Чем больше этот выступ, тем чаще можно отсоединять ножку от изолятора.

Третье направление реставрации связано с ЭВП, которые после изготовления ни разу не включались в рабочий режим и пролежали на складах весь гарантированный срок хранения. Таких приборов сейчас достаточно много, и возможность их эксплуатации вызывает сомнения, поскольку в ЭВП могли произойти нежелательные изменения – натекания через микротрещины или путем диффузии, рекристаллизация сплавов, окисления активных поверхностей остаточными газами и др. Необходимо определить надежность данных приборов для дальнейшей эксплуатации и выбрать меры по восстановлению их работоспособности. А в отдельных случаях – оценить целесообразность вскрытия прибора для коренной реставрации.

Таким образом, вопрос о целесообразности реставрации ЭВП надо решать в единстве экономических, технологических, конструкторских и потребительских требований. Кроме того, в ряде случаев имеет смысл переопределить технико-эксплуатационные требования к ЭВП. Если, скажем, очистка внутренних поверхностей слишком дорога, то встает вопрос либо о полной разборке прибора, либо о допустимости его работы после реставрации с меньшей долговечностью и надежностью, с худшими параметрами. Но реставрация позволяет и увеличить надежность прибора. В принципе, используя современные методы обезгаживания, очистки и активирования, заменив катоды, истратив большие деньги, можно не просто отреставрировать древнюю приемно-усилительную лампу, а сделать ее долговечнее минимум на порядок, на порядок повысить и токоотбор. Только целесообразно ли это экономически?

ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ

При вскрытии реставрируемого прибора всегда возникает проблема очистки его внутренних поверхностей. Степень их загрязнения сильно различается у приборов даже одного типа, например вышедших из строя через короткое время в результате случайного отката и после длительной работы и полного расходования ресурсов. Во втором случае часть элементов конструкции, подверженных действию электронного потока, существенно загрязнена продуктами взаимодействия испаряющихся компонентов катода с другими элементами конструкции (в частности, с коллектором), с остаточными газами, с примесями в материалах деталей. При вскрытии ЭВП на воздухе происходит окисление загрязнений. Ситуация осложняется, когда в силу конструктивных особенностей невозможно очистить объем прибора химическим способом, поскольку остатки химических растворителей нельзя удалить из скрытых полостей и есть опасность воздействия травителей на паяные швы конструкции с нарушением их вакуумной плотности.

Загрязнения, которые невозможно удалить на предварительном этапе обычными методами, могут быть удалены на откатном посту. Это требует корректировки режимов обработки прибора – прогрева оболочки, использования водородо, изменения режима обработки и активирования катода и т.д. Таким путем часть загрязнений можно удалить.

В ряде случаев для очистки эффективна электронная бомбардировка с катода. Но для этого ресурс долговечности катода должен

быть повышен, так как его часть уйдет на обработку прибора. Однако подбор соответствующего катода может не только помочь обезгазить прибор, но и существенно увеличить его долговечность по сравнению с исходным образцом.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕСТАВРИРОВАННОГО ПРИБОРА

Получить достоверную информацию о надежности и качестве единичного прибора, в том числе реставрированного, можно лишь после эксплуатации. Для таких приборов теряют смысл системы контроля, основанные на статистических методах обработки результатов испытаний больших массивов однотипных приборов. Речи нет ни о периодических приемо-сдаточных испытаниях, ни об оценках стабильности производства на основе ускоренных испытаний. Здесь возможны два подхода.

Во-первых, можно контролировать узловые точки технологии, поскольку ни к чему лишний раз проверять многократно испытанный на других типах приборов прием или режим. Но этот подход приемлем для реставрации на предприятии-разработчике прибора, где заведомо известны узловые точки и есть квалифицированные кадры “восстановителей”, способных взять на себя ответственность за корректировку режимов применительно к единичному прибору. Нельзя добиться высокого качества реставрации ЭВП ни в мелкой артели, ни на строго регламентированном серийном заводе.

Второй подход заключается в определении надежности реставрируемого прибора на основе контроля его параметров. Он давно обсуждается в литературе, и отсутствие заметного прогресса в данном направлении связано с недостаточным пониманием прибора как физико-химической системы, реализующей совокупность протекающих в нем процессов старения. Эти неразрывные процессы отражаются на многих параметрах, причем, как правило, не входящих в число приемо-сдаточных. По нашему мнению, анализировать следует именно совокупность таких параметров и применять к ней статистические методы обработки – **совокупность параметров одного прибора вместо совокупности одинаковых параметров массива приборов!** На основе такого анализа, в первую очередь во время прогона, учитывая эксплуатационную информацию и сравнивая набор параметров единичного прибора с поведением аналогичных приборов, вполне можно высказать суждение о надежности испытываемого единичного ЭВП. На этом пути возникают две проблемы.

Так, важная задача – **выбор контролируемых параметров**, характерных для каждого типа ЭВП с присущими ему материалами, катодом, режимами изготовления и эксплуатации. В большинстве случаев выходные, эксплуатационные параметры не являются информативными по отношению к процессам старения прибора. Более того, зачастую эти параметры сознательно выбираются с запасом, чтобы процессы старения на них не сказывались.

Понятно, что множество процессов в приборе невозможно охарактеризовать одним параметром. Каждый процесс (испарение активного вещества катода, адсорбция остаточных газов поверхностями электродов, напыление на изоляторы, распыление материалами коллекторов, тепловое расширение нагретых деталей...) индивидуально и вносит свой вклад в суммарный процесс старения. В силу взаимосвязи этих процессов проявляется и связь между параметрами, поэтому можно лишь условно говорить о преимущественном вкладе отдельного процесса в тот или иной параметр. Правильнее вести речь о минимизации числа этих параметров, об их адекватности рассматриваемому прибору. Так, в таблице 2 представлены некоторые наборы параметров, информативные для ЭВП разных типов.

Таблица 2. Наборы наиболее информативных параметров для различных типов ЭВП

Прибор	Параметр (характеристика)	Что позволяют оценить
Мощный импульсный клистрон	ВАХ в импульсном режиме при различных значениях $U_{\text{накала}}$, включая рабочее	Запас эмиссии, стабильность геометрии ЭОС
	Соответствие формы импульсов напряжения и тока	Анодные эффекты отравления
	Токи утечки между электродами	Степень напыления на изоляторы
	Ток вакиона	Уровень вакуума
Многолучевая ЛОВ с электростатической фокусировкой	Стабильность переходного участка ВАХ	Эмиссионная неоднородность
	Величина тока отражателя	Уровень вакуума, утечки по изоляторам пушки
Маломощная ЛБВ	“Точка перегиба” недовольной характеристики	Степень запаса по эмиссии
	Соотношение ионного и электронного токов в процессе разогрева катода	Изменения вакуума при хранении прибора
Входная ЛБВ спутниковой серии с повышенной долговечностью	Динамика изменения сопротивления подогревателя при разогреве катода	Рабочая температура
Магнетрон средней мощности	Соотношение токов в рабочем режиме и без генерации	Степень обратной бомбардировки
	Недовольная характеристика в непрерывном режиме при нагрузке, равной средней нагрузке в импульсном режиме	—

Не менее важна и проблема **обработки результатов изменений параметров и получение вывода о надежности.**

Эффективен широко используемый метод экстраполяции результатов измерения параметров во время тренировки и прогона прибора. Данный метод индивидуального прогнозирования долговечности был успешно опробован на двух типах серийных отражательных клистронов, при этом прогнозирующим параметром являлась величина тока катода при недокале, а граница экстраполяции определялась из статистики испытаний массива аналогичных приборов. Без такой статистики при реставрации сразу возникает вопрос — до каких пор законна экстраполяция?

Для реставрации крайне важна информация об эксплуатации: сколько времени прибор работал в заданном режиме, какие случались нештатные ситуации, как из них выходили и т.д. Она может во многом способствовать выбору стратегии реставрации. Для изделий, работающих в ответственной аппаратуре, такая информация фиксируется, но получить ее для нужд анализа и реставрации часто не удается. По нашему мнению, необходимо установить порядок заказов на реставрацию с обязательным представлением данных о предыдущей работе приборов в аппаратуре, о времени и условиях хранения, характере отказа.

В области суждения о надежности явно необходимы новые подходы и к выбору параметров, и к способам обработки информации.

ПРИМЕРЫ РЕСТАВРАЦИИ ЭВП

Рассмотрим ряд примеров реставрации приборов в ФГУП НПП “Исток”. Реставрация достаточно типична для этапа освоения прибора производством, когда проявляются недоработки в инструментари, в подборе технологических режимов, в обучении технического персонала. Примером реставрации такого типа является освоение лампы бегущей волны (ЛБВ) средней мощности в металлокерамическом корпусе, имеющей металлопористый термокатод с повышенной плотностью отбираемого тока. Дефекты проявлялись после откочки прибора и были связаны с неточной установкой геометрии электронно-оптической системы

(ЭОС). Поскольку объем выпуска в течение ряда лет был малым, освоение затянулось и реставрировать приходилось почти половину всех производимых приборов. При реставрации было удобно заменить всю ЭОС вместе с катодным узлом на новую, провести слабую химическую очистку внутренних поверхностей прибора. Подобная реставрация была сравнительно дешевой и позволяла восстановить работоспособность более чем у половины дефектных приборов.

Сложнее дело обстоит с приборами, приходящими из сферы эксплуатации. Реставрация каждого прибора обсуждалась представителями главного конструктора прибора, цеха-изготовителя, катодного отдела и контролирующих подразделений. Показательна реставрация серии мощных импульсных клистронов, разработанных на “Источе”. Прибор имел губчатый оксидный катод и электроразрядный насос. Причинами отказов были выработка ресурса катода, отравление катода, перегорание подогревателя, не всегда понятный уход геометрии ЭОС. Во всех этих случаях обязательна замена сразу трех элементов — катодного узла, его держателя на ножке и фокусирующего электрода. Последние две детали могли быть и от реставрируемого прибора, но тщательно очищенными и отоженными. Иногда требовалась замена и электроразрядного насоса. Химическая очистка внутренних поверхностей прибора была затруднена, поэтому ее недостаточность пытались компенсировать увеличением времени термовакуумной обработки на посту, иногда в 1,5 раза по сравнению с серийным прибором, с обязательным напуском водорода в откачиваемый прибор при его прогреве под печью. По отрывочным сведениям, при эксплуатации реставрированных приборов существенного ухудшения параметров не наблюдалось, хотя отношение к ним всегда было несколько настороженным.

Еще один пример — выходная ЛБВ средней мощности с металлопористым катодом, с которого в непрерывном режиме отбирался ток сравнительно небольшой плотности (для этого типа катодов). Из анализа отказов следовало, что после некоторого времени работы проявлялось натекание по шву в районе коллектора. Реставрация включала очистку от компаунда (прогревом на воздухе), два реза по швам (по месту течи и по шву катодной ножки), химическое травление окисленной поверхности коллектора и новую пайку шва в его области, замену катодного узла, герметизацию прибора и повторение всех процедур откочки и настройки. Рекламаций от потребителя на отреставрированные приборы не поступало.

Примером внедрения в реставрируемый прибор принципиально новых узлов служат замены катодных узлов разработки 50–70-х годов узлами 80–90-х годов. При реставрации усилительного клистрона разработки 70-х годов решили заменить губчатый оксидный катод с запасом активного вещества 20 мг/см² современным пресованным металлооксидным катодом с запасом активного вещества 70–100 мг/см². Долговечность отреставрированного прибора составила 3 тыс. часов вместо 1,5 тыс. у исходного.

В магнетроне разработки 50-х годов губчатый оксидный катод с запасом активного вещества 12–16 мг/см² заменили пресованным металлооксидным катодом с запасом активного вещества 25–30 мг/см². Одновременно скорректировали резонаторную систему. Долговечность прибора после реставрации возросла с 500–1000 до 2–4 тыс. часов. Процент выхода годных после реставрации — более 80%.

Магнетрон с выходной импульсной мощностью 2 МВт проработал в составе закупленной еще в советское время иностранной аппаратуры заданный срок службы в 10 тыс. часов. Поскольку зарубежная фирма за комплектацию запросила неприемлемую цену,



встал вопрос о реставрации и замене их губчатого оксидного катода на наш, разработки “Истока”, с запасом активного вещества до 100 мг/см². Долговечность первого из реставрированных приборов уже достигла 30 тыс. часов, еще пяти – 10–12 тыс. часов.

Отметим, что простая “замена” устаревшего узла более современным может дать новое качество. Так, “замена” оксидного катода металлизированным позволила без изменения конструкции ЛБВ средней мощности УВ-232 заставить отбор тока повышенной плотности и в несколько раз увеличить процент выхода годных. “Замена” оксидного эмиттера на металлопористый и металлической управляющей сетки на графитовую позволили фирме Varian реализовать идею клистрода. В каждом из этих случаев слово “замена” берется в кавычки, ибо каждый раз она сотрясала всю технологическую цепочку изготовления прибора.

В связи с повышением долговечности приборов возникает немаловажный в современных условиях вопрос – а нужна ли она производителю? Интересы потребителя и производителя оказываются в противоречии, поскольку с ростом долговечности падает потребность как в продукции последнего, так и в новых разработках. Решение этого противоречия, по-видимому, – в привязке цены прибора к его долговечности – более долговечные приборы должны стоить дороже, а разницу в стоимости целесообразно направлять на развитие производства и в новые разработки.

Вопросов в статье больше, чем ответов на них. Но сама постановка вопросов показывает и сложность проблем, и возможные пути их решения. Очевидно, что основой этих решений должен быть системный подход – с точки зрения как технологии, так и экономики. ○