

ПОДГОТОВКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОЩНЫХ КЛИСТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СИСТЕМ СВЧ-ПИТАНИЯ ЛУЭ

В.Н. Борискин, Р.Н. Дронов, Р.А. Ефимов, Ю.Д. Тур

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Харьков, Украина

E-mail: tur@kipt.kharkov.ua

Приводятся данные по восстановлению, подготовке и эксплуатации высоковольтных клистронов типа КИУ-12-АМ «Аврора», являющихся основными источниками высокочастотного питания линейных электронных ускорителей в ННЦ ХФТИ. Основываясь на опыте подготовки и эксплуатации большого массива промышленных клистронов, а также вновь разрабатываемых методик контроля параметров, оцениваются особенности и оптимизируются процессы обезгаживания приборов, активировки катодов, высоковольтной и высокочастотной тренировки клистронов, обеспечивающие требуемые выходные параметры и максимально возможный ресурс. Анализируются результаты эксплуатации опытных образцов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников высокочастотного питания линейные ускорители электронов ХФТИ используют импульсные клистронные усилители типа КИУ-12-АМ на частоте 2797 МГц с импульсной выходной мощностью до 20 МВт и средней 2,6 кВт при частоте посылок 50 Гц и длительности импульса до 2,5 мкс. Прибор разработан ФГУП НПП «Исток» (г. Фрязино, Россия) и передан в серийное производство в начале 70-х годов НПО «Контакт» (г. Саратов, Россия).

В настоящее время, в связи с существенным уменьшением объема производства электровакуумных приборов (по данным работы [1] за последние 10 лет в России более чем в 30 раз), а в случае клистронов КИУ-12-АМ полное прекращение выпуска, возникла проблема их восстановления. В этой связи нами была разработана и внедрена технология реставрации подготовки клистронов.

Ниже приводятся основные результаты усовершенствования приборов, основанные на данных эксплуатации промышленных образцов, описываются их технология восстановления, методы контроля параметров и оптимизации процессов подготовки. Приводятся данные результатов эксплуатации опытных образцов реставрированных клистронов.

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КЛИСТРОНОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ

Являясь основным потребителем КИУ-12-АМ (более 100 клистронов в год и в совокупности с 1965 по 1991 годы более 3200 экземпляров), обладая базой для проведения исследований и испытаний, нами, совместно с производителем, постоянно осуществлялись работы по их усовершенствованию. Анализ документальных данных подконтрольной подготовки и эксплуатации этого массива, а также проведенные исследования и усовершенствования обеспечили существенное увеличение их надежности и долговечности. В частности, относительное число отказов в результате естественного старения катодов было повышено с 40 до 80 %. Оптимизация

условий активировки, температурного режима катода и оптимизация процесса высоковольтной тренировки позволили увеличить эмиссионную долговечность катодов, что в совокупности с уменьшением «конструктивных» отказов дало возможность поднять среднюю эксплуатационную долговечность с 1000 часов в начале производства до 8700 часов в его конце.

Влияние процессов активировки и тренировки высоковольтных клистронов, на наш взгляд, определяется, прежде всего, кинетической природой формирования и работы оксидных катодов, когда обеспечивается квазиравновесное состояние структуры катода в тепловых и электрических полях [2]. В частности, установлено, что рабочая температура катода, выбранная на основании анализа недокальных характеристик, соответствует установленной в период начальной высоковольтной тренировки клистронов. При этом, как показал опыт эксплуатации, для данного вида катодов и приборов существует оптимальный диапазон, при котором обеспечивается более высокая долговечность.

На Рис.1 приведена гистограмма результатов статистического анализа данных по среднему сроку службы клистронов.

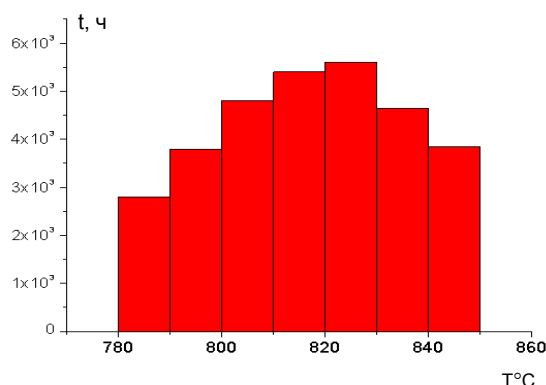


Рис.1. Эмиссионная долговечность в зависимости от начальной рабочей температуры катода

В рассмотрении вошли приборы, обладающие близкими параметрами по режимам тренировки (средняя скорость подъема напряжения в диапазоне от 180 кВ до максимального значения) и режимам эксплуатации (среднее эксплуатационное напряже-

ние и число существенных (более 20 кВ) долговременных изменений режимов эксплуатации) в зависимости от начальной температуры катода. Рассмотрен массив из 370 экземпляров, среднестатистический разброс – 42 %.

Такое же влияние на эмиссионную долговечность оказывают характеристики процесса тренировки, когда путем постепенного, ступенчатого увеличения анодного напряжения, с одной стороны обеспечивается очищение поверхности электродов от центров автоэмиссии, приводящих к возникновению пробойных явлений, и, с другой, квазиравновесное состояние структуры оксидного катода в тепловых и сильных электрических полях.

Анализ долговечности приборов с рабочей температурой катодов в диапазоне 810...830°C и обладающих близкими параметрами по режимам эксплуатации, показал, что существуют оптимальные средние скорости подъема анодного напряжения при тренировке, обеспечивающие электрическую прочность системы и сохранение запаса эмиссионной долговечности приборов. На Рис.2 приведена гистограмма результатов статистического анализа данных по среднему сроку службы эксплуатации клистронов в зависимости от средней скорости повышения анодного напряжения. При рассмотрении массива из 420 клистронов, среднестатистический разброс составил 37 %.

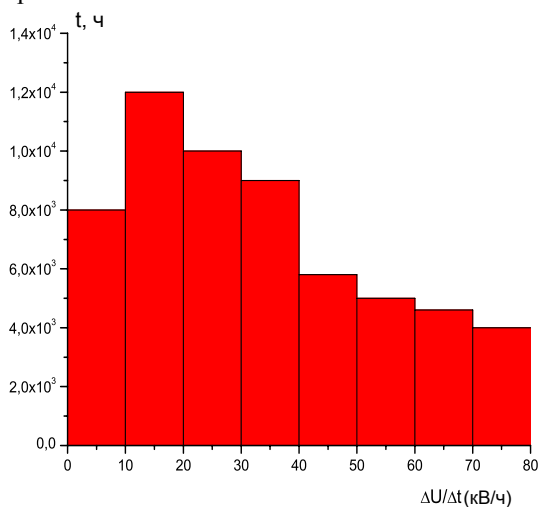


Рис.2. Эмиссионная долговечность в зависимости от скорости подъема ВН при тренировке

Таким образом, очевидно, что при оценке качества реставрированного прибора, наряду с рассмотрением других информативных параметров, должны быть приняты во внимание и оптимизированы процессы подготовки клистронов к эксплуатации. При этом нужно учитывать, что каждый процесс (испарение и срыв активного вещества катода в процессе тренировки и эксплуатации, естественное снижение эмиссионной активности катода в процессе эксплуатации, адсорбция остаточных газов поверхностями электродов, напыление на изоляторы, распыление материалов коллекторов, тепловое расширение нагретых деталей...) индивидуален и вносит свой вклад в суммарный процесс старения. Исходя из этого, нами были разработаны дополнительные методы анализа.

Во-первых, это оценка эмиссионного запаса и режима работы пушки прибора. Исследования показали: несмотря на то, что в этих приборах используется пирсовская оптика, напряжения настолько велики, что в процессе работы, а соответственно и естественного снижения эмиссионной активности катодов, происходит переход из режима преимущественного ограничения пространственным зарядом в режим, когда основную роль играют автоэмиссионные процессы. При этом существенно увеличивается вероятность возникновения пробоев в клистроне, срыва оксидной массы и уменьшения долговечности. Моделирование этой ситуации осуществляется в процессе подготовки прибора к эксплуатации путем анализа вольт-амперных характеристик при сниженных рабочих температурах катода.

Второе направление нашей работы заключалось в разработке методов анализа и обеспечения оптимальности режимов подготовки и эксплуатации приборов. В первую очередь, это относится к процессу высоковольтной и высокочастотной тренировки прибора. Здесь главным условием сохранения эмиссионного запаса и электрической прочности является условие предотвращения мощных пробоев, приводящих к необратимым разрушениям поверхностей электродов прибора.

При выборе метода обеспечения этого условия за основу был взят общепризнанный принцип преимущественного предшествования необратимым процессам и разрушения явлению понижения стабильности работы системы, то есть увеличение дисперсии сигналов. И хотя сам процесс тренировки по своей природе определяет необходимость создания предпробойных и пробойных состояний, эти явления не должны приводить к необратимым разрушениям поверхностей электродов и катода. Другими словами, процесс тренировки предопределяет возрастание нестабильности работы и возникновение пробойных явлений, однако, эти процессы должны быть ограничены по своей амплитуде и накопленной мощности.

Суть предложенного метода тренировки заключается в том, что решение о возможности повышения напряжения основывается на оценке дисперсии импульсного анодного тока в начальный момент пошагового подъема анодного напряжения и степени ее снижения в процессе тренировки в данном режиме.

Реализация этого метода базируется на аппаратном и программном обеспечении, разработанном для компьютерной диагностики и прогнозирования отказов импульсных ускорителей [3, 4]. Здесь многоканальная измерительная система осуществляет непрерывный контроль амплитуды и формы выходных импульсных сигналов. В качестве примера на Рис.3 показаны видеодиаграммы контроля сигналов ВЧ-систем на ускорителе ЭПОС.

На основании полученных данных, используя в качестве контролируемого параметра коэффициент вариации $K = D^{1/2}/M$, где M – среднее значение амплитуды импульсов, производится оценка изменения дисперсии D амплитуды импульсов.

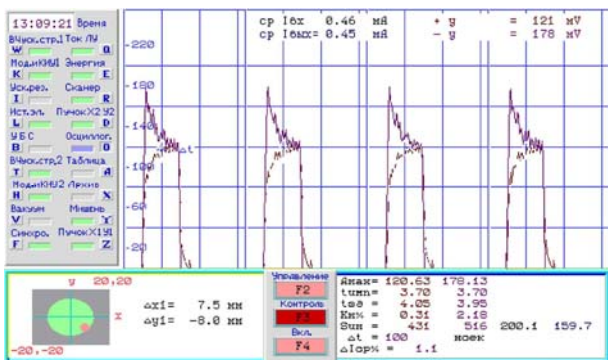


Рис.3. Видеограммы контроля сигналов ВЧ-систем на ускорителе ЭПОС

Для выяснения возможности использования коэффициента вариации в качестве критерия – «предвестника» отказов систем ускорителя, проведено сравнение результатов выборочной оценки изменений K с данными записей в диспетчерских журналах отказов технологических ускорителей. Анализ более 150 отказов в системах этих ускорителей показал, что 70 % случаев отказов на системе предшествует возрастание дисперсии выходного параметра данной системы.

Для прогнозирования отказов выбраны пороговые значения (уставки) K . Назовем их a и b . Величина предаварийной уставки a , позволяющей реагировать на первую группу отказов, выбиралась несколько больше верхней границы 90 %-го доверительного интервала значения K при исправной работе системы. Обозначим это значение как K_0 . В нашем случае для большинства систем ЛУЭ a оказалась равной $1,1 K_0$. Аварийные уставки b , выявляющие отказы второй группы, выбираются на основании технических условий на системы ускорителя и приняты нами в десять раз больше предаварийных. На основании экспериментальных исследований для системы ВЧ-питания ускорителя уставки соответственно были выбраны $a=0,05\%$ и $b=0,5\%$ (Рис.4).

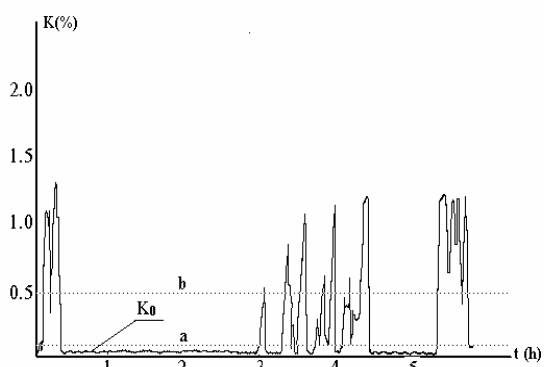


Рис.4. График изменения коэффициента вариации амплитуды импульсов ВЧ-поля на выходе секции

В нашем случае контроля процесса тренировки на каждом шаге подъема анодного напряжения оценивается степень возрастания дисперсии амплитуд сигналов. В случае превышения контрольных значений, напряжение снижалось, оставаясь выше амплитуды предыдущего шага тренировки. Режим тренировки на данном уровне стабилизировался. Осуществлялись замеры и анализ интегральных характеристик импульсов. Оценивался коэффициент

вариации амплитуды во времени. При снижении дисперсии ниже установочного уровня производился следующий шаг подъема анодного напряжения. Учитывая наличие двунаправленной связи в системе «высоковольтный модулятор-клистрон», периодически производился корреляционный контроль неустойчивостей импульсного тока и напряжения.

3. ПОДГОТОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕСТАВРИРОВАННЫХ КЛИСТРОНОВ

Мы провели разработку и внедрение технологии восстановления усилительных клистронов в случаях наиболее характерных отказов: «потеря эмиссии», «пробой промежутка катод-анод» и «пробой и разгерметизация ВЧ-вводов», составляющих более 80 % всех видов отказов при работе клистронов с частотой посылок до 300 Гц и длительностью импульса 5 мкс. Дополнительно была разработана технология производства катодов. Технологический цикл состоит из таких основных процессов: (i) расчленение КИУ, что реставрируется, на корпус и катодный изолятор с катодной стойкой; (ii) установка нового катода; (iii) при необходимости – замена СВЧ-ввода, керамического конуса, клистронного насоса и др.; (iv) приваривание откатного штенгеля; (v) проверка собранной сборки на герметичность; (vi) установка клистронов на стойку с печами, соединение его с откатным постом и откатка до давления ниже $10 \dots 5$ Па ($10 \dots 7$ Торр); (vii) обезгаживание прогреванием до повторного получения давления ниже $10 \dots 5$ Па; (viii) выключение прогрева, активирование катода введением напряжения до рабочего значения с получением давления ниже $10 \dots 5$ Па; (ix) перекрытие вентиля штенгеля, установка клистронов на высоковольтный тренировочный стенд, включение и доведение режима работы близко к граничному с измерением СВЧ-мощности; (x) окончательная герметизация клистронов перекусыванием штенгеля и выдача его на работу или сохранение.

Как и в случае промышленных образцов, исследование характеристик реставрированного прибора включает в себя необходимость решения двух основных вопросов. Во-первых, это оценка и достижение рабочих параметров и, во-вторых, получение информации и обеспечение его надежности и ресурса работы. Как правило, основа решения первого вопроса определена техническими условиями эксплуатации прибора и государственными стандартами на разработанные методы измерения и аппаратуру. В частности, для усилительных клистронов оценка выходных параметров, относящихся к приемосдаточным, включает в себя измерения вольт-амперных характеристик, выходной импульсной и средней мощности, нагрузочного КПД, коэффициента и полосы усиления, а также гармонический состав выходного сигнала.

Решение второго вопроса, о получении информации и обеспечении надежности и ресурса работы реставрированных клистронов, основывалось на опыте подготовки и подконтрольной эксплуатации промышленных образцов, а также разработанных методов и аппаратуры.

В частности, при обезгаживании прибора и активировки катода контролируются временные характеристики процессов повышения температуры и накала при условии сохранения вакуума в клистроне не хуже 5×10^{-5} мм рт.ст. На Рис.5 показаны типичные зависимости для приборов с сентерированным и прессованным оксидным катодом соответственно. Кривая 1 соответствует температуре верхнего спая изолятора катодной ножки. Кривая 2 – пластины керамического конуса. Кривая 3 характеризует процесс активировки катода, т.е. повышение температуры (накала) катода до рабочего значения.

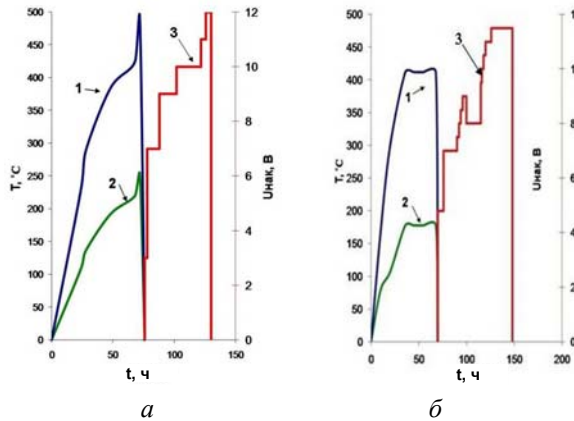


Рис.5. Временные характеристики процессов обезгаживания и активировки приборов с сентерированными (а) и прессованными (б) оксидными катодами

При подаче высокого напряжения, на низких уровнях оценивается недокальная характеристика катода и выбирается рабочая температура катода, близкая к оптимальной (820°C), при которой и осуществляется тренировка. После ее окончания недокальные характеристики измеряются при рабочих анодных напряжениях, и выбирается эксплуатационная рабочая температура, соответствующая точке перегиба недокальной характеристики (Рис.6).

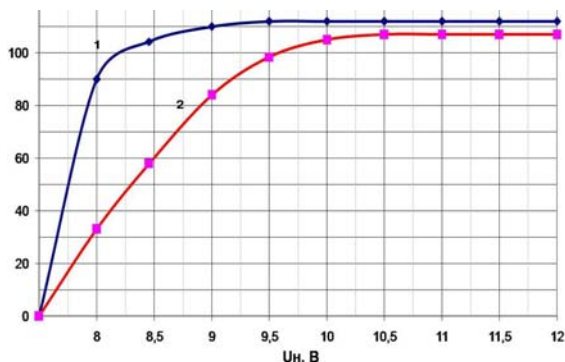


Рис.6. Недокальные характеристики сентерированного (кривая 1) и прессованного (кривая 2) оксидных катодов

Процесс тренировки заключается в постепенном поднятии анодного напряжения клистрона ступенями по 5...10 кВ. Время поддержания текущего режима определяется условием исчезновения пробойных явлений и снижения нестабильности амплитуды и интегральных значений импульсного тока ниже заданной величины. Разработанная компьютерная диагностика позволяет вести постоянное слежение за фор-

мой и амплитудой всех рабочих импульсов. Обработка полученной информации дает возможность оценивать в реальном времени динамику изменения нестабильностей сигналов и их корреляционную связь. Анализ этих данных, в свою очередь, позволяет оптимизировать процесс тренировки, исключая возможность возникновения необратимых нарушений поверхностей электродов и структуры катодов.

В частности, на Рис.7 представлено замеренное распределение числа импульсов (ось Y), синхронизации (1), анодного напряжения (2), выходной мощности (3) и анодного тока (4) в зависимости от величины интегральных значений импульсов, непосредственно после очередного шага повышения анодного напряжения при тренировке клистрона.

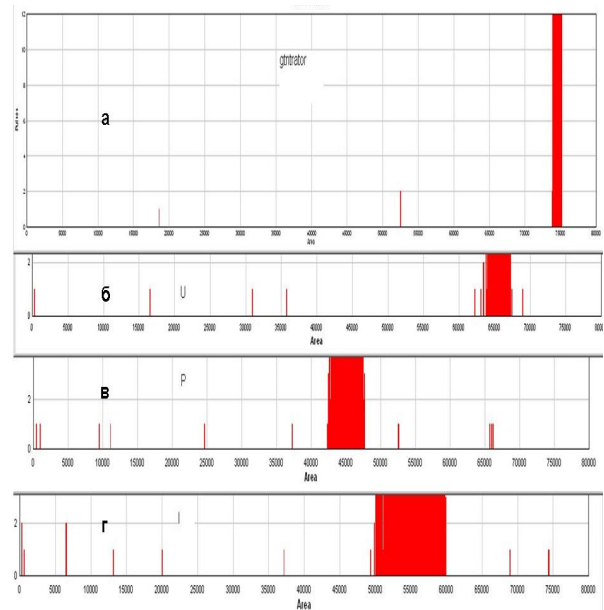


Рис.7. Распределение числа импульсов (ось Y) в зависимости от их интегральных значений (ось X)

Как видно, на данном этапе наибольшую дисперсию имеют интегральные значения импульсов анодного тока. Поддержание этого режима в течение определенного времени обеспечивает ее снижение до уровня дисперсионных характеристик анодного напряжения, что определит завершение процесса тренировки при данном напряжении. Далее процедура подъема напряжения пошагово повторяется до рабочего значения, когда процесс тренировки заканчивается.

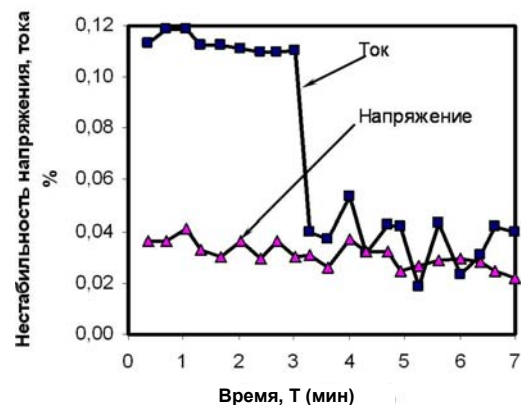


Рис.8. Корреляционный контроль стабильности импульсного напряжения и тока клистрона

Величина изменения амплитуды на каждом шаге контролируется по значению дисперсии сигнала анодного тока и соответствующего ему анодного напряжения. Зависимости, приведенные на Рис.8, иллюстрируют ситуацию превышения дозванного уровня подъема анодного напряжения и переход в шадающий режим тренировки для его нормализации.

Типичные временные характеристики подъема анодного напряжения при тренировке реставрированных приборов приведены на Рис.9.

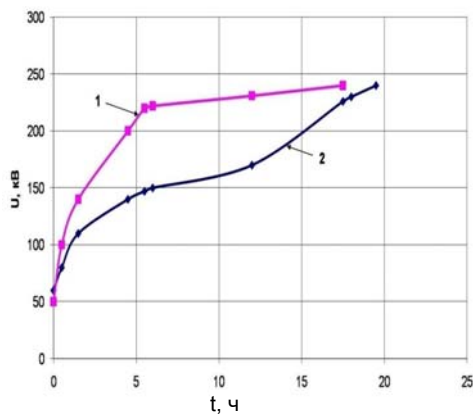


Рис.9. Временные зависимости подъема анодного напряжения при тренировке реставрированных приборов с сентерированным (1) и прессованным (2) оксидными катодами

Для приборов с сентерированным катодом эти зависимости соответствуют оптимальным режимам тренировки промышленных клистронов, определенным на основании большого массива статистических данных по результатам их эксплуатации.

По окончании высокочастотной тренировки осуществляются: высокочастотная тренировка, корректировка рабочей температуры катода и оценка его эмиссионного запаса. Путем измерения вольт-амперных характеристик при различных температурах катода, на основании зависимостей сопротивления луча прибора от анодного напряжения определяется температура, при которой происходит переход из режима ограничения пространственным зарядом в режим преимущественной автоэмиссии. Именно величина диапазона температур от рабочего значения до переходного определяет эмиссионный запас. Типичные зависимости приведены на Рис.10.

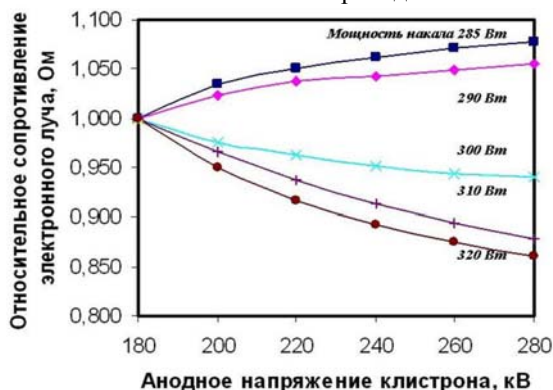


Рис.10. Зависимости сопротивления луча прибора от анодного напряжения при различных мощностях подогревателя катода

Измерения основных выходных параметров, таких как импульсная выходная мощность, коэффициент и полоса усиления, осуществлялись известными методами в соответствии с государственными стандартами. Результаты этих измерений показали, что их характеристики, включая уровни гармоник, соответствуют параметрам промышленных клистронов.

В частности, на Рис.11 представлены усредненные зависимости изменений уровня импульсной выходной мощности и коэффициента усиления реставрированных приборов от анодного напряжения, измеренные при частоте посылок 50 Гц и длительности импульса 2,5 мкс. Указанная на графике ошибка соответствует среднеквадратичному отклонению для массива из 17 реставрированных клистронов.

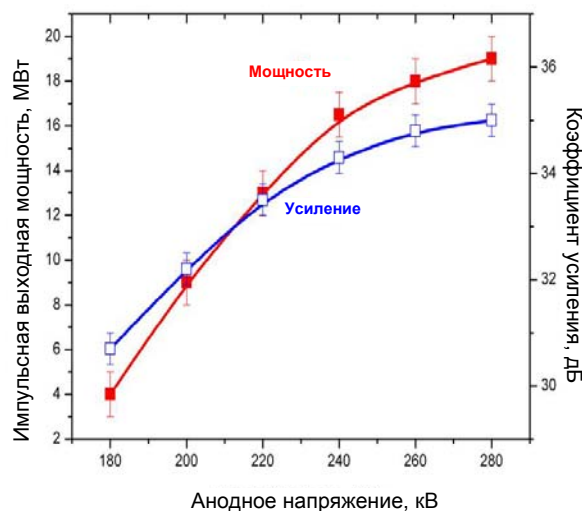


Рис.11. Зависимости изменений уровня импульсной выходной мощности и коэффициента усиления от анодного напряжения клистронов

Проведенные исследования также показали, что и другие параметры реставрированных клистронов соответствуют техническим условиям эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании разработанных технологий восстановления 17 экземпляров клистронов КИУ-12 (4 из них с одновременной заменой катода и высокочастотного ввода), а также 37 прессованных (совместно с НПО «Орион») и 26 сентерированных оксидных катодов. Проверка характеристик, динамические испытания и долговременная эксплуатация реставрированных клистронов и катодов показали, что их характеристики соответствуют техническим условиям эксплуатации.

Разработанные методы контроля параметров и процессов подготовки обеспечили достаточно высокую надежность и долговечность. В частности, средняя эмиссионная наработка на отказ для этих клистронов, эксплуатировавшихся при частоте посылок до 300 Гц и длительности импульса до 5 мкс, составляет 7070 ч (гарантийный срок службы промышленных образцов – 3000 ч при частоте посылок 50 Гц и длительности импульса 2,5 мкс).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. Бакуменко, А. Киселев, А. Соколов. Проблемы реставрации ЭВП в современной России // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2001, №5, с.30-33.
2. G. Gaertner, D. Engelsen. Hundred years anniversary of the oxide cathode-A historical review // *Applied Surface Science*. 2005, v.1, 251, p.24-30.
3. V.N. Boriskin. Computer Diagnostics and Forecasting of Pulse Electron Linac Failures // *Proceedings of the ICALEPCS'01 (San Jose, USA)*. 2001, p.594-596.
4. В.Н. Борискин, В.В. Верещака, В.А. Ляховец, А.А. Сарвилов, А.И. Косой. Исследование статистических характеристик электрических параметров клистронного генератора линейного ускорителя электронов ЛУЭ-10 // *Доклад на IX конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям*, Харьков, 21-25 февраля 2011 г.

Статья поступила в редакцию 04.10.2011 г.

PREPARATION AND EXPLOITATION OF POWERFUL KLYSTRON AMPLIFIERS FOR LINAC RF POWER SUPPLY

V.N. Boriskin, R.N. Dronov, R.A. Efimov, Yu.D. Tur

The paper presents data about restoration, preparation and operation of high voltage klystrons type of "Aurora" that are used as main source of high frequency power supply of linear electron accelerators in NSC KIPT. In consideration of the experience in operation of huge amount of industrial klystrons and development of new methods to parameters control, processes of degassing devices, cathode activation, high voltage and high frequency klystron train to achieve output performance objectives and maximal life time are optimized and features are estimated. The results of prototype operation are analyzed.

ПІДГОТОВКА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПОТУЖНИХ КЛІСТРОННИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ СИСТЕМ НВЧ-ЖИВЛЕННЯ ЛПЕ

В.М. Борискін, Р.М. Дронов, Р.О. Єфімов, Ю.Д. Тур

Наводяться дані по відновленню, підготовці та експлуатації високовольтних клістронів типу КИУ-12-АМ «Аврора», що є основними джерелами високочастотного живлення лінійних електронних прискорювачів у ННЦ ХФТІ. Грунтуючись на досвіді підготовки і експлуатації великого масиву промислових клістронів, а також методик контролю параметрів, що знов розробляються, оцінюються особливості і оптимізуються процеси знегажування приладів, активування катодів, високовольтного і високочастотного тренування клістронів, що забезпечують необхідні вихідні параметри і максимально можливий ресурс. Аналізуються результати експлуатації дослідних зразків.