

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ РЕНТГЕНОВСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

ШАШИЧ Борис

Директор по разработкам

ПИНДРИС Сэм

Старший руководитель проекта по промышленному рентгену

УИЛЛСИ Джим

Директор по развитию бизнеса

Spellman High Voltage Electronics Corporation,

Хауптаг, Валхалла, шт. Нью-Йорк, США

Рентгеновская трубка представляет собой электровакуумный прибор, преобразующий поступающую электрическую энергию в рентгеновское излучение. Предшественниками рентгеновских трубок являются опытные трубки Крукса, с помощью которых рентгеновское излучение было впервые «официально» открыто 8 ноября 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном. Первым ученым, открывшим рентгеновское излучение, признан именно В. К. Рентген, хотя рентгеновские лучи могли случайно создаваться и другими учеными в ходе более ранних экспериментов. В 1913 г. Уильям Кулидж усовершенствовал трубку Крукса, и к 1920 г. трубка Кулиджа стала наиболее распространенной рентгеновской трубкой с термокатодом.

В трубке Кулиджа электроны испускаются благодаря термоэлектронной эмиссии, чаще всего с помощью вольфрамовой нити, накаливаемой электрическим током. Нить в трубке является

Рассматриваются основные виды отказов рентгеновских трубок: образование дугового пробоя, обрыв нити накала и перегрев фокусного пятна, а также их влияние на конструкцию рентгеновского генератора. Рентгеновский генератор должен нивелировать высокую энергию, вырабатываемую при появлении дугового пробоя, и предотвращать сильные повреждения рентгеновской трубки. Он также должен обеспечивать максимальный срок службы трубки за счет активного регулирования тока накала и надлежащего охлаждения электронных компонентов и рентгеновской трубки (в случае с генератором Monoblock®). Не стоит недооценивать важность фундаментальных методик проектирования рентгеновского генератора для обеспечения оптимальных эксплуатационных характеристик и длительного срока службы рентгеновской трубки для промышленного применения.

Ключевые слова: рентгеновские генераторы, рентгеновские трубки, высокое напряжение, образование дугового пробоя в рентгеновской трубке, регулирование накала рентгеновской трубки, Monoblock®.

катодом. Между катодом и анодом подается высокое напряжение, при этом происходит ускорение электронов, которые затем сталкиваются с анодом.

Несмотря на то что работа рентгеновской трубки представляется очень простой, выбор подходящего рентгеновского генератора в зависимости от условий применения может обеспечить оптимальные эксплуатационные характеристики, высокую надежность и длительный срок службы трубки.

Отказы рентгеновской трубки в конце срока службы

Хорошо спроектированная, качественно изготовленная и надлежащим образом применяемая рентгеновская трубка может надежно и бесперебойно работать на протяжении многих тысяч часов. Учитывая необратимый эффект старения, можно выделить два основных типа отказов в конце срока службы: критический дуговой пробой и перегорание нити накала.

Дуговой пробой

При штатной эксплуатации нить накала нагревается до высоких температур (выше 1500°C). Со временем оболочка трубки, находящаяся напротив узлов под высоким напряжением (анод и катод), металлизирована под воздействием медленного процесса, известного как испарение вольфрама. Металлизированный слой увеличивает проводимость поверхности оболочки (выполненной из стекла или керамики), что в итоге приводит к дуговому пробую на стенку трубки. В случае со стеклянными трубками такой дуговой пробой может привести к образованию отверстия в стекле и в итоге к выходу из строя рентгеновской трубки, как показано на рис. 1.

Этот тип неисправности характерен для рентгеновских трубок, используемых при напряжении, близком к максимальному (номинальному) значению. Испарение вольфрама имеет меньшее влияние на металлокерамические рентгеновские трубки, поскольку их конструкция обес-

печивает минимальное отложение вольфрама на стенках трубки. Однако, учитывая неизбежное испарение вольфрама во всех рентгеновских трубках, рентгеновский генератор должен обеспечивать средства контроля дугового пробоя за счет применения пассивных и активных схем для отключения высоковольтного питания и восстановления работы после пробоя в целях продления срока службы рентгеновской трубки.

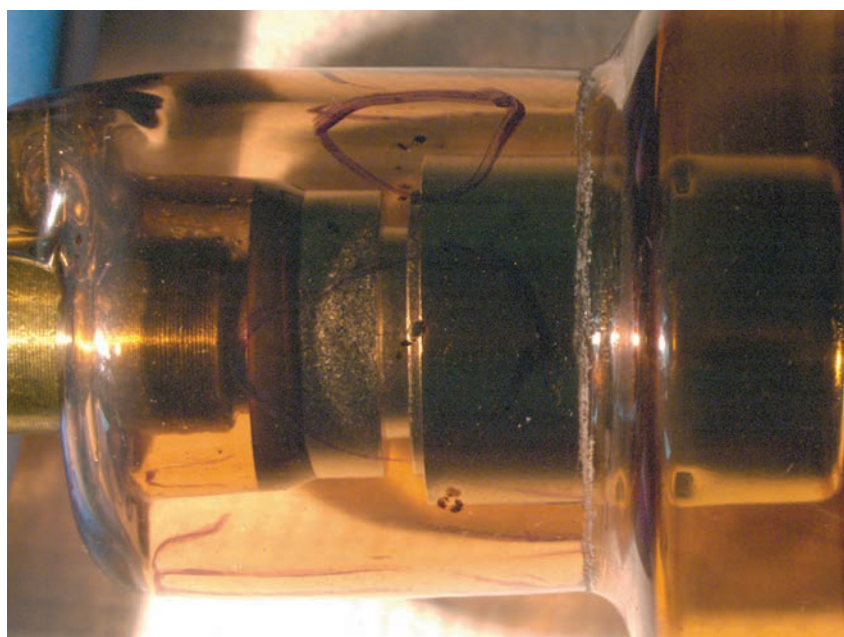
Пример контроля дугового пробоя рентгеновским генератором

Во многих конструкциях генераторов контроль пробоя обеспечивается цифровым сигнальным процессором (ЦСП) или микроконтроллером в целях гашения дугового пробоя. Этот процесс зачастую называется «откатом». При возникновении разряда важно, чтобы генератор быстро отключил генерацию высокого напряжения и вернул высокое напряжение обратно на уровень -5% от значения в момент образования разряда, тем самым давая некоторое время для восстановления трубки и поглощения всех оставшихся молекул газа. Все описанные шаги занимают менее 1 мкс. Современные рентгеновские генераторы имеют полностью программируемые схемы контроля разрядов, которые могут быть отрегулированы пользователем для различных условий применения и подстроены к конкретным требованиям к трубкам.

Выявление дугового пробоя

Токи разряда определяются трансформатором тока в схеме обратной связи высокого напряжения рентгеновского генератора, как показано на рис. 2, а.

Сигнал обратной связи о разряде (ARC SENSE) подается на компаратор на системной плате управления, настроенной на определение предельного тока



а)



б)

Рис. 1. Стекло́нная трубка с многочисленными следами дугового пробоя, некоторые из которых привели к образованию отверстий в стекло́нной оболочке (а), увеличенное изображение стекло́нной поверхности в месте повреждения стенки трубки (б)

разряда и контрольный уровень высокого напряжения (рис. 2, б). С помощью этой схемы можно предотвратить ложное определение дугового пробоя, при этом микроразряды игнорируются. Сигнал ARC поступает и фикси-

руется в программируемой пользователем матрице логических элементов (FPGA) в течение сотен наносекунд и отключает генерацию высокого напряжения для гашения дугового разряда. Это гашение называется «откатом».

Пример восстановления генерации после обнаружения дугового пробоя

После обнаружения пробоя регулятор высокого напряжения выполняет «откат», а ЦСП отвечает за определение, целесообразно ли восстанавливать высокое напряжение или выдавать сигнал о критическом дуговом пробое (рис. 3). При каждом дуговом пробое ЦСП будет увеличивать значение счетчика дуговых разрядов. Если обнаружен первый дуговой разряд, а пороговое значение для количества дуговых разрядов >1 , ЦСП отсчитывает время гашения пробоя и повторно включает высокое напряжение. Эта последовательность может продолжаться до тех пор, пока количество выявленных дуговых разрядов не

превысит количество дуговых разрядов, запрограммированных в регистре пороговых значений счетчика дуговых разрядов. Пороговые значения времени гашения разряда и счетчика дуговых разрядов могут быть заданы пользователем в настройках пользователя.

Перегорание нити накала

Даже когда рентгеновские трубки работают при напряжении, значительно меньшем максимального (номинального) значения, все равно происходит металлизация оболочки. Однако, учитывая более низкую скорость отложения металла и повышенное номинальное напряжение, образование дугового пробоя не является основной причиной отказа. Согласно кри-

вым зависимости тока (мА) в трубке от тока нити накала, приведенным на рис. 4, при фиксированном выходном токе в трубке ток нити накала увеличивается по мере снижения выходного напряжения.

При повышенном токе нити накала, который свидетельствует о необходимости более высокой температуры нити накала, происходит ускоренное испарение материала нити пропорционально T^4 в четвертой степени (где T – температура нити накала, К), даже незначительное увеличение температуры нити накала при возведении в четвертую степень приводит к значительному увеличению испарения материала нити.

При испарении вольфрама нить истончается, что в конечном итоге приводит к механическому разрыву нити. Считается, что если масса нити накала снизилась приблизительно на 10 %, то срок службы нити истек (нить исчерпала свой ресурс на 98%). Такое сокращение массы соответствует сокращению диаметра нити приблизительно на 5%.

Не все рентгеновские трубки обладают одинаковыми характеристиками накала. Разные характеристики накала требуют разных параметров контроля для обеспечения стабильного тока эмиссии. Высокотехнологичные универсальные генераторы обладают такими способностями управления эмиссией, которая позволяет работать со многими рентге-

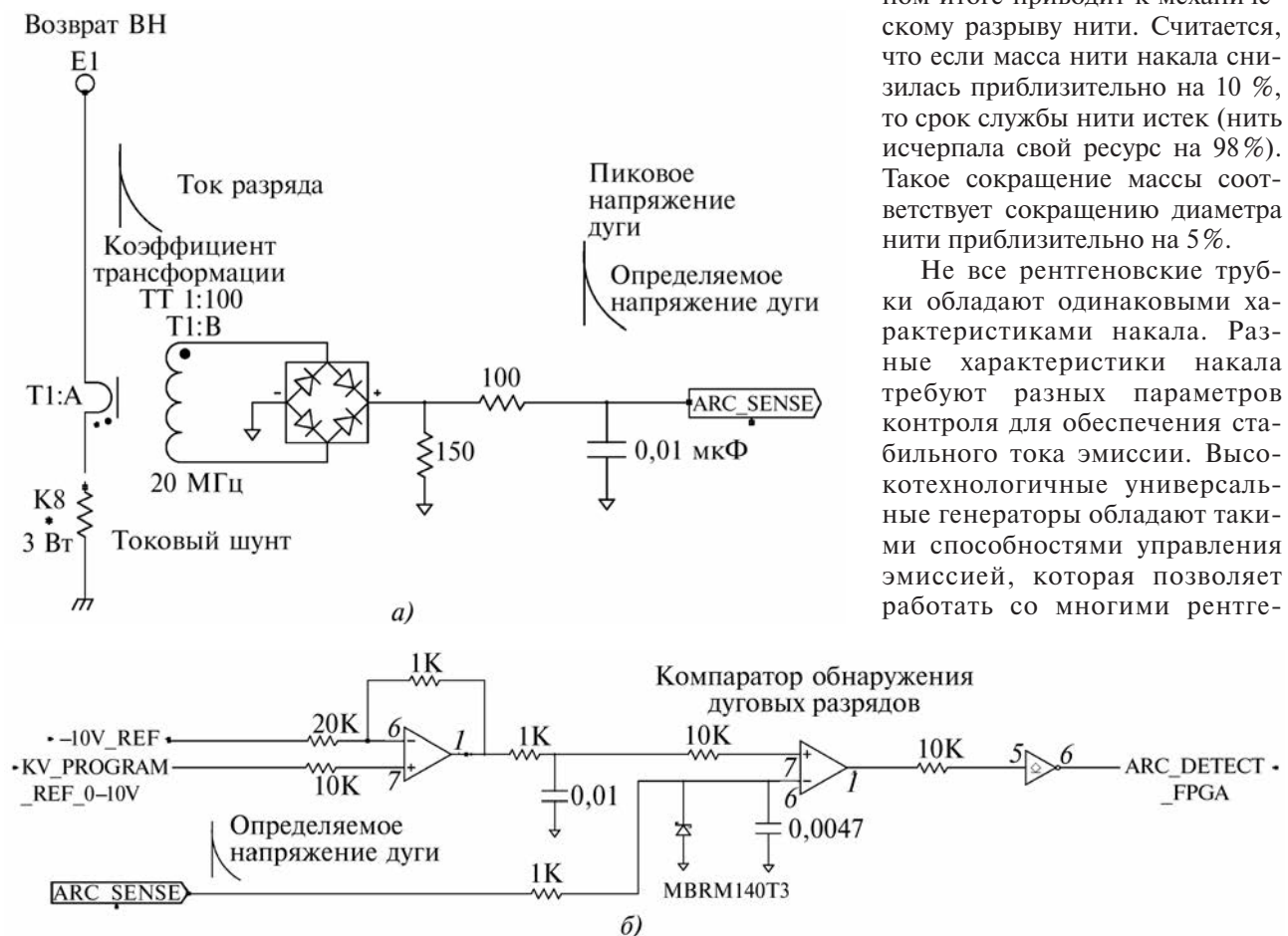


Рис. 2. Примеры схем определения разряда (а) и обнаружения разряда (б) в рентгеновском генераторе

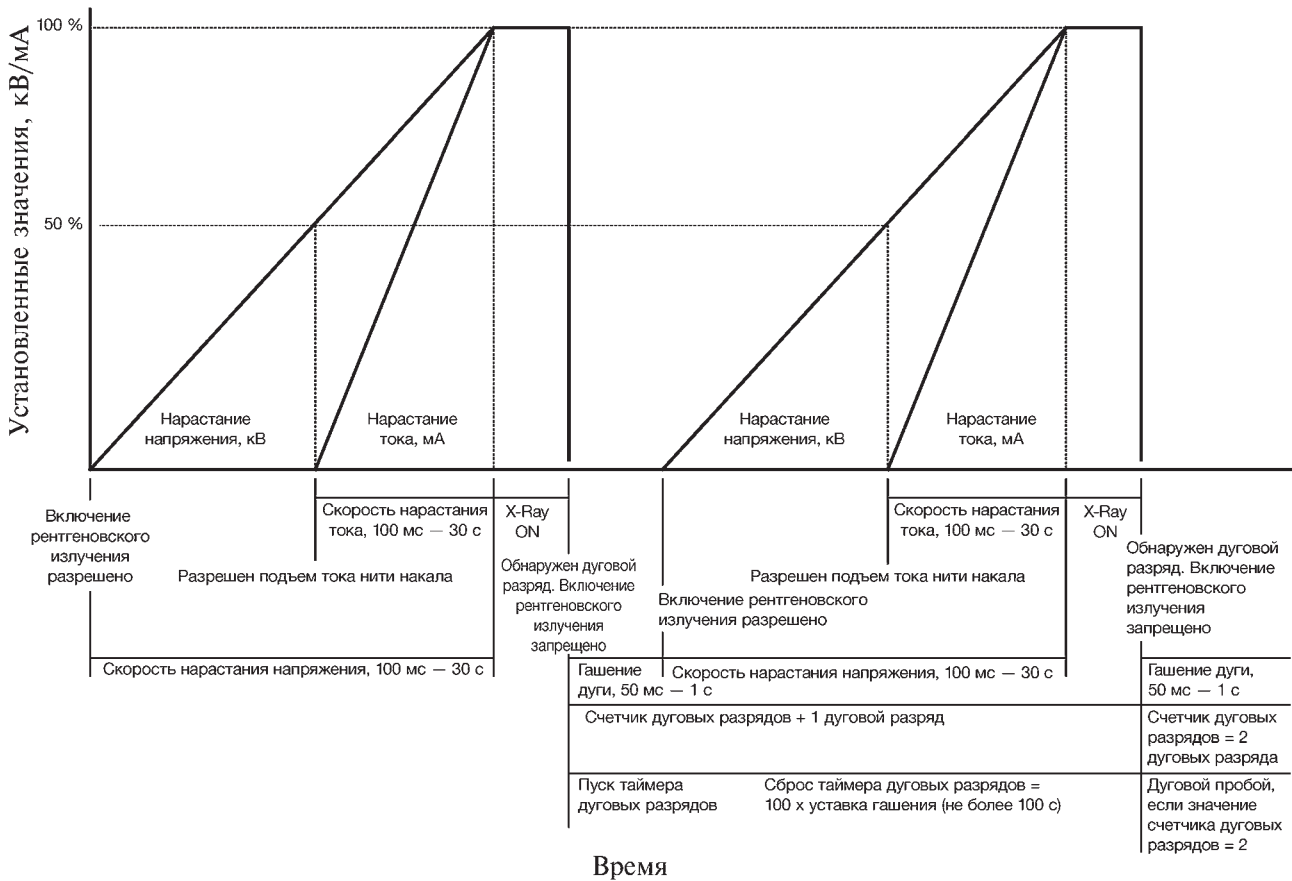


Рис. 3. Пример дугового пробы с «откатом» напряжения, гашением пробы и восстановлением генерации

новскими трубками. Некоторые рентгеновские трубки могут не попадать в данную категорию и требуют специальных настроек для обеспечения стабильной эмиссии.

Нетипичные отказы рентгеновских трубок

Отказы рентгеновских трубок на ранних этапах зачастую являются результатом применения неверной технологии производства, использования неподходящих материалов или неправильного применения трубок. Первые две причины связаны с процессами обеспечения качества на предприятии-изготовителе, при этом мы в большей степени заинтересованы в надлежащей работе рентгеновских трубок с точки зрения работы рентгеновского генератора.

Рентгеновский генератор может продлить срок службы трубок за счет обеспечения устойчивого выходного напряжения с низким уровнем пульсаций, условий низкого пускового напряжения и надлежащей изоляции высокого напряжения в соответствующей требованию охлаждающей среде, как в случае с промышленными блоками Mopblock®.

Нарастание тока накала

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на долговечность промышленных рентгеновских трубок, является плавное поднятие напряжения нити накала при включении. Для достижения нитями накала рабочей температуры требуется несколько сотен миллисекунд. Если повышение тока на нити накала происходит слишком

быстро, на нити возникает значительное механическое напряжение, при этом преимущества от быстрого увеличения выходной мощности рентгеновского излучения будут минимальными. Такой сценарий показан на рис. 5.

В этом случае ток накала (фиолетовая кривая) быстро увеличивается, но температура нити, отвечающая за выходной ток (желтая кривая), не может быстро достичь рабочего значения. В итоге схема с обратной связью по току (мА) будет повышать ток нити накала до заданного максимума до тех пор, пока нить не нагреется до температуры, достаточной для начала эмиссии электронов рентгеновским генератором. В этот момент ток (мА) быстро увеличится и далее не будет регулироваться согласно схеме повышения тока (мА) (голубая

Зависимость выходного тока от тока накала (SVH Tube, S/H 1131)

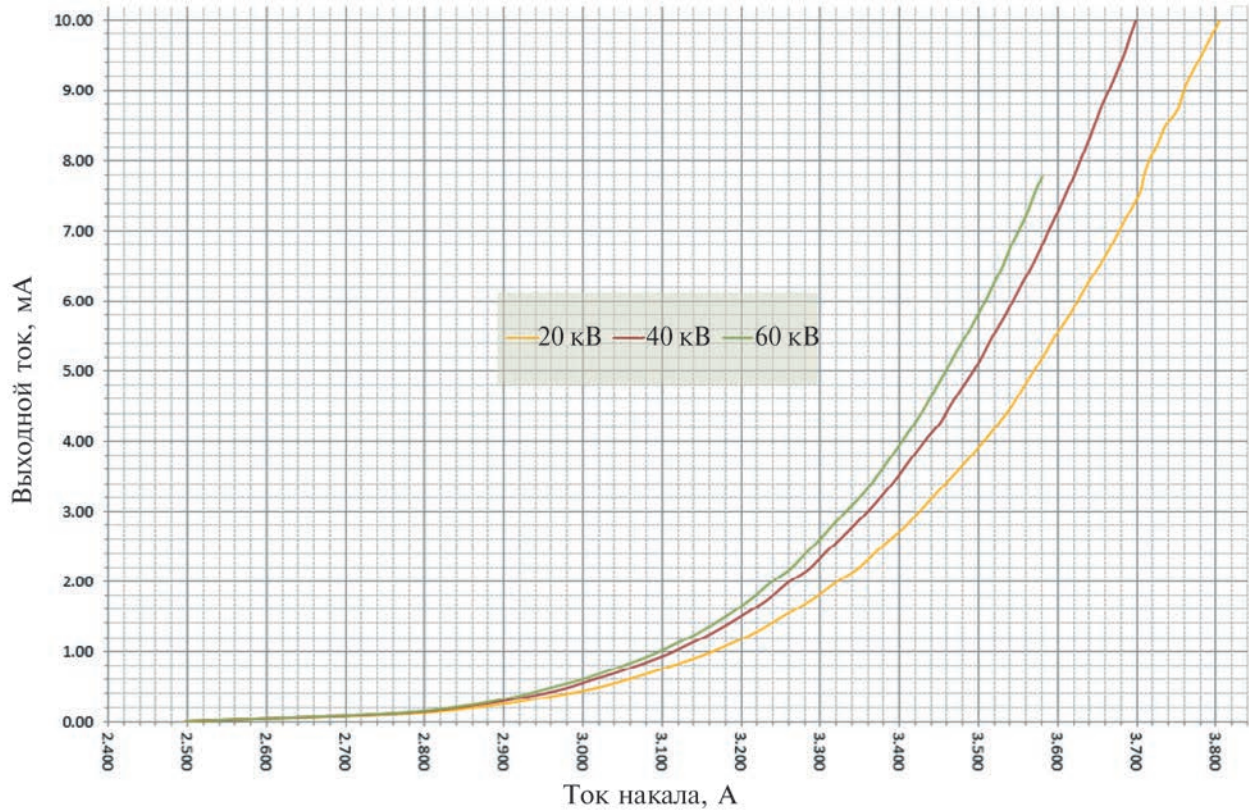


Рис. 4. Типовые характеристики рентгеновской трубки. При снижении напряжения на аноде рентгеновской трубки для поддержания постоянного выходного анодного тока ток нити накала необходимо увеличивать. Выходной ток и ток накала – среднеквадратические значения

кривая). Витки нити накала подвергаются воздействию высокого тока в течение нескольких сотен микросекунд, и этот процесс повторяется при каждом включении рентгеновских генераторов. Быстрый подъем напряжения накала может быть основным фактором, вызывающим преждевременные отказы нитей накала.

Для минимизации этого эффекта в правильно спроектированном рентгеновском генераторе будет использоваться программа для увеличения тока нити и прописаны предельные значения, которые могут быть выбраны индивидуально с учетом рекомендаций изготовителя для конкретной рентгеновской трубки. Один из таких примеров показан на рис. 6.

Наиболее важной настройкой для защиты нити накала

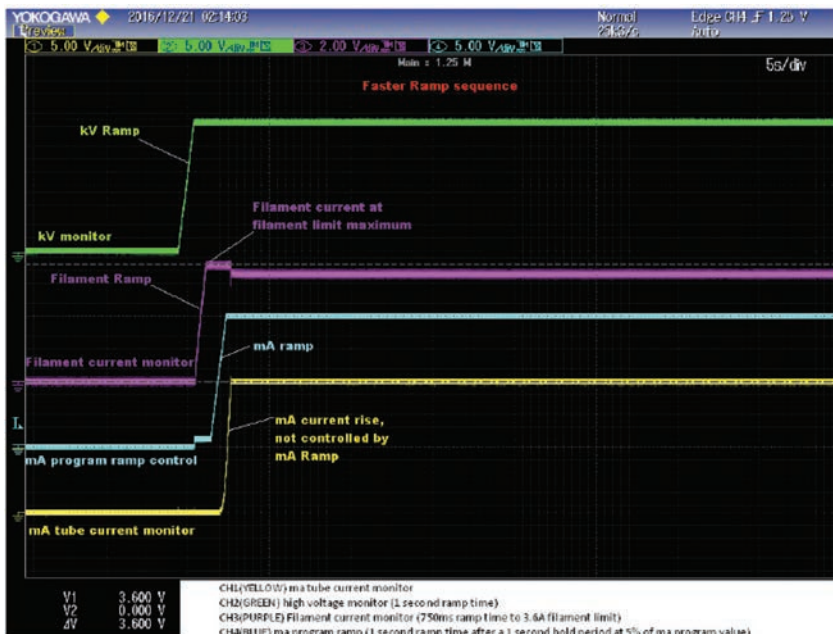


Рис. 5. Ток накала и выходной ток при быстром нарастании тока накала

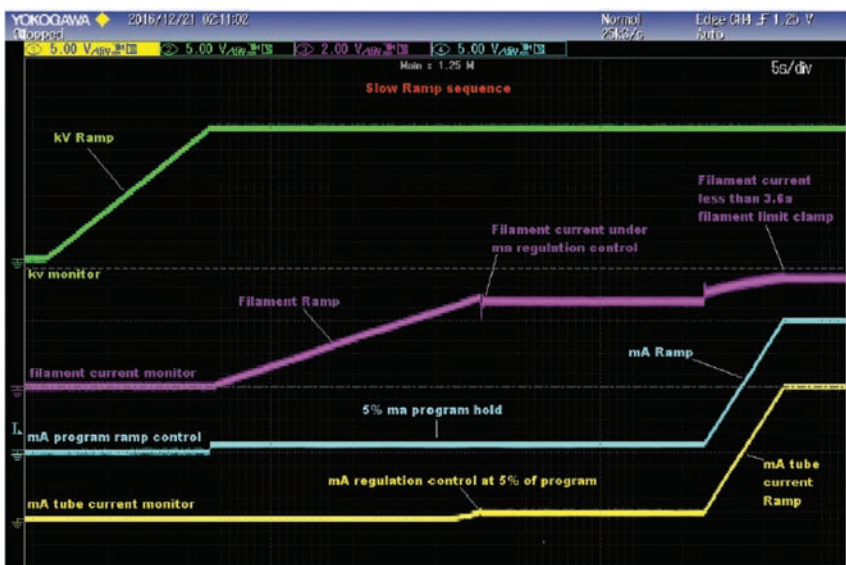


Рис. 6. Оптимизированное повышение тока нити накала сокращает механическое напряжение нити рентгеновской трубки

рентгеновской трубки является предельное значение тока для нити. Настройка предельного значения тока для нити — это настройка максимального тока, указанная изготовителем рентгеновской трубки для достижения максимального тока эмиссии при минимальном значении высокого напряжения (кВ). Настройка данных требований происходит при установке трубки. Максимальные значения тока для нити могут быть заданы ниже значений, рекомендованных изготовителем, если при использовании достигается требуемый ток эмиссии.

Если время повышения тока нити регулируется в соответствии с тепловыми свойствами нити, то предельные значения тока не будут достигаться, и максимальное значение тока будет установлено как рабочее. Более того, нить накала достигает рабочей температуры к моменту включения схемы управления током эмиссии, что приводит к корректному повышению тока трубки (желтая кривая), которое регулируется схемой управления (голубая кривая).

Влияние длины высоковольтного кабеля на нити накала с питанием переменным и постоянным током

Как говорилось ранее, одним из наиболее важных параметров трубки является предельное значение тока для нити накала. Предельные значения тока ограничивают максимальный выходной ток источника питания нити накала для защиты нити в рентгеновской трубке. Заданное значение должно быть равно или ниже указанного производителем в техническом паспорте. При этом необходимо учитывать и другие факторы.

Питание нитей накала переменным током. Нити накала с питанием переменным током работают на высокой частоте, за счет чего подача энергии по длинным высоковольтным кабелям становится затруднительной из-за большого сопротивления. На калибровку нити накала может повлиять изменение длины высоковольтного кабеля, поэтому может потребоваться изменение настроек калибровки нити.

Питание нитей накала постоянным током. Следует учитывать потери в медных высоковольт-

ных кабелях, связанные с сортаментом проволоки и длиной кабеля. При использовании источника питания нитей накала постоянным током со схемой регулирования тока нет необходимости в дополнительных регулировках, если используемый высоковольтный кабель не длиннее максимально установленной длины.

Настраиваемые пользователем параметры рентгеновского генератора

С помощью универсального рентгеновского генератора обеспечивается питание для различных рентгеновских трубок, используемых в самых разных условиях. Стандартные значения увеличения напряжения (кВ), выходного тока (мА) и тока накала должны быть по умолчанию выставлены на максимальную скорость нарастания, которая будет обеспечивать соответствие требованиям к конкретным условиям применения, но оставаться в заданных изготовителем пределах для безопасного регулирования процессов в трубке. Для трубок с другими параметрами, которые не соответствуют стандартным настройкам по умолчанию, должна быть предусмотрена простая перенастройка параметров.

Некоторые стандартные рентгеновские генераторы обладают расширенными настройками и высоким уровнем индивидуализации.

На рис. 7, а приведен снимок графического пользовательского интерфейса, с помощью которого пользователи могут выполнить индивидуальную настройку рентгеновского генератора для конкретных условий его применения, оптимизировать эксплуатационные характеристики трубки и генератора, а также обеспечить защиту и про-

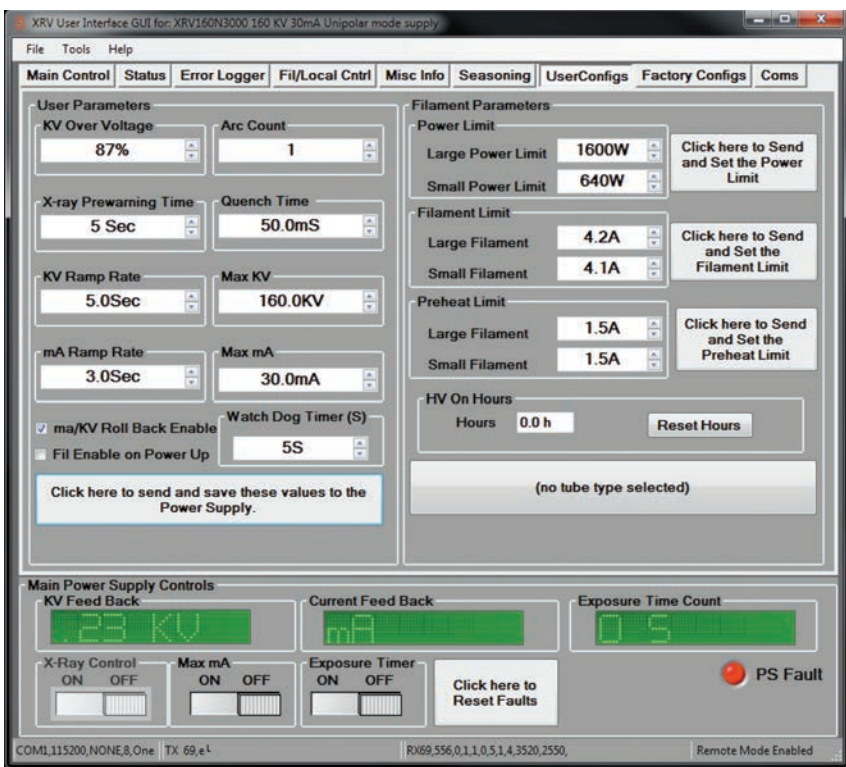


Рис. 7, а

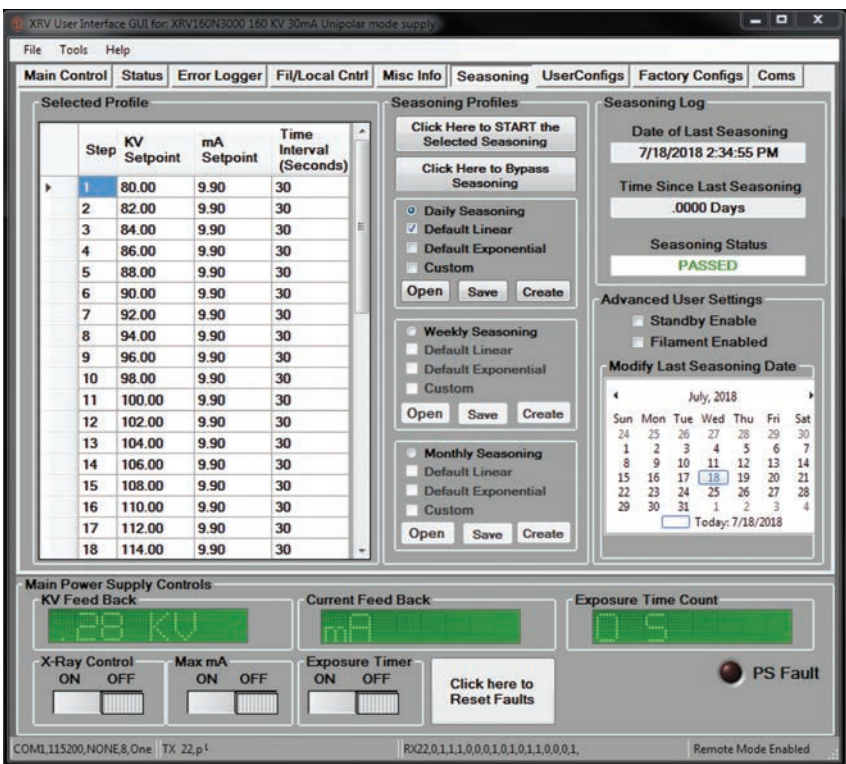


Рис. 7, б

длить срок службы рентгеновской трубки. Многие из указанных выше основных параметров можно легко и быстро установить в программе.

Данные о возможностях настройки некоторых рентгеновских генераторов приведены в таблице. Все условия применения рентгеновского излучения имеют свои отличительные особенности, и очень важно правильно и бережно работать с рентгеновской трубкой.

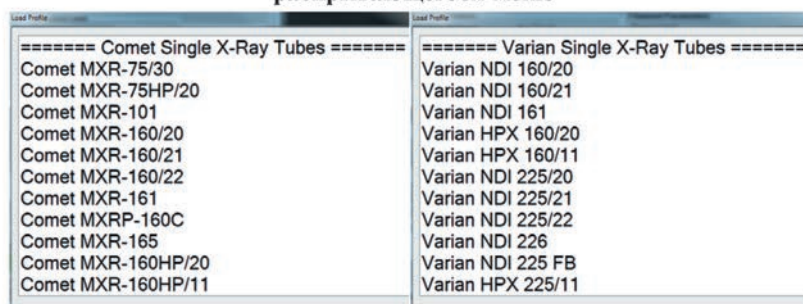
И без того достаточно простой процесс внесения значений параметров рентгеновских трубок в генератор может быть значительно упрощен. Если используется стандартная рентгеновская трубка серийного производства, изготовитель генератора может легко внести значения в базу данных, чтобы пользователю нужно было лишь выбрать необходимую модель трубки и автоматически загрузить необходимые настройки. Таким образом, процесс настройки упрощается, а также обеспечивается дополнительное преимущество исключения человеческого фактора при подготовке трубки и генератора к совместной работе. Параметры для не включенных в базу данных трубок можно легко добавить и сохранить.

В следующем разделе описывается генератор с возможностью автоматической загрузки настроек рентгеновских трубок путем выбора модели трубки из раскрывающегося списка.

Автоматическая загрузка параметров трубок с помощью раскрывающегося меню

Если используемая рентгеновская трубка выполнена по индивидуальному заказу или не включена в раскрывающееся меню, настройки трубки можно ввести вручную, сохранить их и в дальнейшем выбирать из списка (рис. 7, в).

Автоматическая загрузка параметров трубок с помощью раскрывающегося меню



в)

Рис. 7. Снимки графического пользовательского интерфейса для настройки конфигурации управления трубкой (а) и для тренировки трубок (б), раскрывающееся меню в графическом пользовательском интерфейсе для автоматической загрузки необходимых настроек трубки (в)

Профили автоматической и индивидуальной тренировки трубки

Помимо возможности выбрать модель трубки из раскрывающегося меню и загрузить информацию профиля, также имеется возможность использования рекомендованных изготовителем программ тренировки трубок (рис. 7, б). В зависимости от того, когда рентгеновская трубка использовалась или тренировалась в последний раз, генератор может автоматически выбрать подходящий профиль для тренировки трубки. Для всех трубок в раскрывающемся списке имеются ежедневные, еженедельные и ежемесячные профили для тренировки, а для

Таблица. Пример настраиваемых параметров рентгеновского генератора

Параметр/функция	Диапазон	Значение по умолчанию	Примечания
Предельные настройки накала, верхняя граница XRV160,225 XRV320,450	0 – 4000 Вт 0 – 4500 Вт	3000 Вт 4500 Вт	См. данные по трубке
Предельные настройки накала, нижняя граница XRV160,225 XRV320,450	0 – 4000 Вт 0 – 4500 Вт	3000 Вт 4500 Вт	См. данные по трубке
Максимальное напряжение XRV160 XRV225 XRV320 XRV450	0 – 160 кВ 0 – 225 кВ 0 – 320 кВ 0 – 450 кВ	160 кВ 225 кВ 320 кВ 450 кВ	
Максимальный ток	0 – 30 мА	30 мА	
Предельный ток накала, верхняя граница	0 – 6 А	4 А	Расчетный ток при фактической нагрузке
Предельный ток накала, нижняя граница	0 – 6 А	4 А	Расчетный ток при фактической нагрузке
Ток прогрева нити накала, верхняя граница	0 – 6 А	2 А	Типовое значение: предельный ток, верхняя граница/2
Ток прогрева нити накала, нижняя граница	0 – 6 А	2 А	Типовое значение: предельный ток, нижняя граница/2
Счетчик дуговых разрядов	0 – 30	1	
Время гашения дугового разряда	10 мс – 1 с	50 с	Показания счетчика будут сброшены при значении 100× заданное значение (не более 100 с)
Скорость нарастания напряжения (кВ)	100 мс – 30 с	5 с	Типовое значение 5 с
Скорость нарастания тока (мА)	100 мс – 30 с	5 с	Типовое значение 5 с
Время предупреждения	0 – 30 с	1 с	Предупреждение перед включением высокого напряжения (включение рентгеновского излучения)

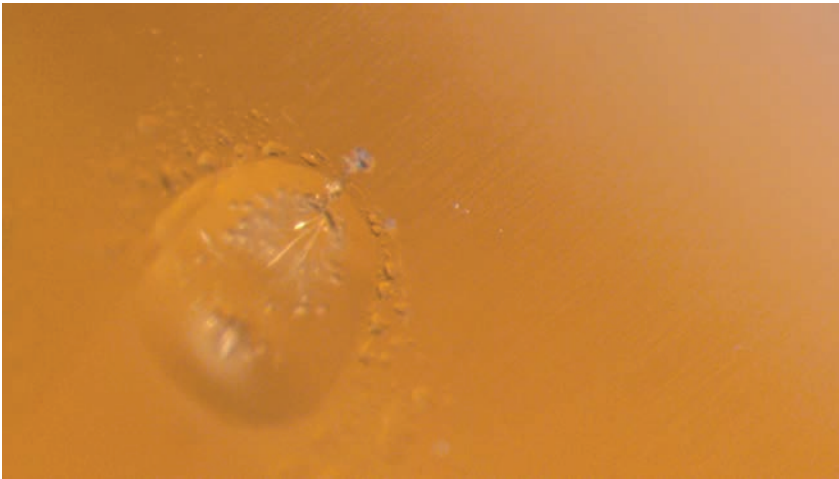


Рис. 8. Отверстие в стеклянной трубке, образованное под воздействием высокого электрического напряжения



Рис. 9. Стекло с протравлениями, образовавшимися под действием электрического поля

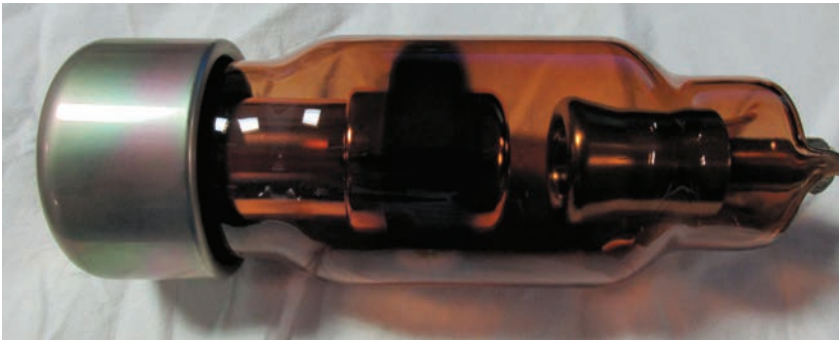


Рис. 10. Рентгеновская трубка, работающая в среде горячего масла с тонким слоем обуглившегося масла на поверхности

трубок, не включенных в этот список, можно создать индивидуальные профили.

Высоковольтная изоляция

Одной из основных проблем, связанных с проектированием промышленных моноблоков Monoblock®, является обеспече-

ние среды с низким электрическим напряжением для работы рентгеновской трубки. Помимо надлежащей высоковольтной изоляции также важно учитывать максимальное электрическое поле и методики распределения данного поля. Проблемы, связанные с ненадлежащими мера-

ми распределения электрического напряжения, могут привести к внезапным и быстрым отказам, например к образованию сквозных отверстий в стекле, как показано на рис. 8.

В случае, представленном на рис. 8, стеклянная оболочка была пробита одним дуговым разрядом. Типичным для этого типа отказа является отсутствие черных отметин, характерных для отверстий, образующихся в конце срока службы, когда происходит множество дуговых разрядов, приводящих к карбонизации перед окончательным отказом трубки.

Еще одной проблемой, связанной с ненадлежащим моделированием электрического поля, являются скрытые отказы, при которых заряженные частицы начинают протравливать стекло, что приводит к повышенному току утечки, постепенному повышению количества дуговых разрядов и в конечном итоге к окончательному отказу трубки. Этот тип отказа показан на рис. 9.

Такой тип отказа формируется в течение нескольких недель или даже месяцев. Он является особо критичным на ранних стадиях, поскольку его сложно заметить: ток утечки начинает увеличиваться, что приводит к ошибкам в измерении выходного тока, поскольку часть измеренного тока не участвует в формировании рентгеновского излучения. Фактически доза рентгеновского излучения начинает сокращаться, хотя кажется, что ток трубки эффективно контролируется. Далее возникает случайный дуговой разряд, и с течением времени частота образования дуговых разрядов увеличивается, что приводит к устойчивой неисправности трубки.

Терморегулирование

Рентгеновские трубки являются устройствами с крайне низким КПД. В форму рентге-

новского излучения переходит менее 1 % мощности, а более 99% рассеивается в виде тепловой энергии. Для обеспечения длительного срока службы рентгеновской трубки эту тепловую энергию необходимо надлежащим образом контролировать для предотвращения значительного повышения температуры.

Обычно в качестве охлаждающей среды используется трансформаторное масло с оптимальным сочетанием изоляционных и тепловых свойств. За счет этих свойств обеспечивается достаточно простая циркуляция масла по различным теплообменникам для эффективного регулирования температуры при различных условиях.

Без надлежащего терморегулирования рентгеновская трубка может подвергаться трем основным видам воздействия:

- 1) повышенные внутренняя температура и скорость испарения, что приводит к разрушительным дуговым разрядам;
- 2) повышение температуры стекла, которое приводит к пригоранию масла, что, в свою очередь, увеличивает фильтрацию рентгеновского излучения и ухудшает изолирующие свойства масла, а это может привести к диэлектрическому пробоему во многих частях высоковольтных блоков. Трубка без надлежащего охлаждения с проблемой такого типа показана на рис. 10;
- 3) ненадлежащее отведение тепла от анодного узла, в результате чего рабочая температура рентгеновской трубки превышает температуру плавления вольфрама (рис. 11). Это приводит к плавлению фокусного пятна, что имеет три критических побочных эффекта:
 - а) увеличение размера фокусного пятна;
 - б) более жесткое рентгеновское излучение в связи с дополнительной фильтрацией;



Рис. 11. Повреждение фокусного пятна из-за недостаточного охлаждения анода и термомеханического воздействия

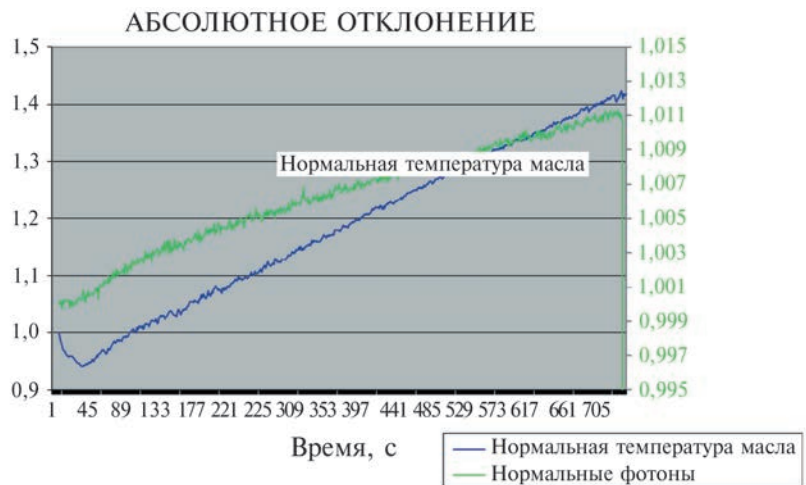


Рис. 12. Отклонение дозы рентгеновского излучения в зависимости от рабочей температуры

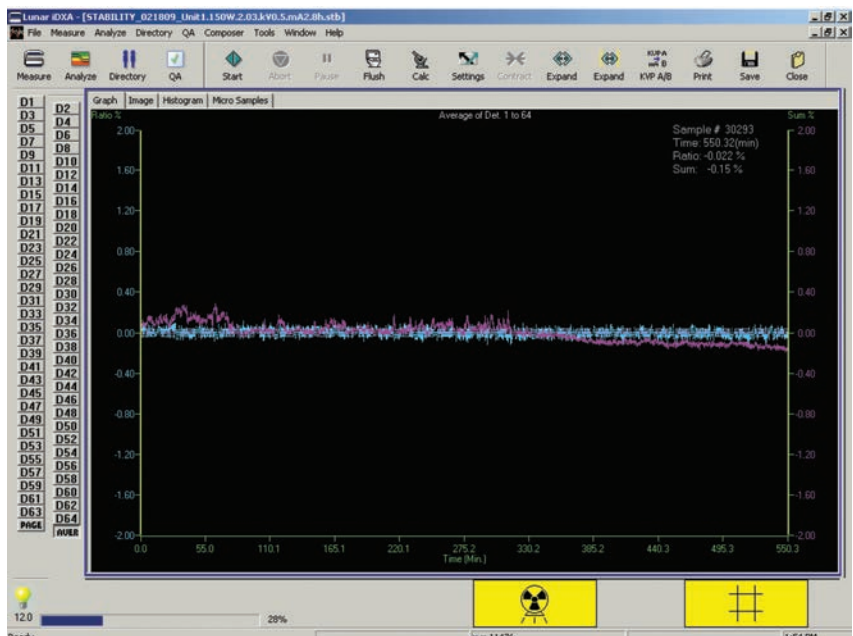


Рис. 13. Эксплуатационные характеристики компенсированного источника рентгеновского излучения

в) дополнительное испарение вольфрама, приводящее к металллизации и неустраняемым отказам трубок.

Стабильность дозы излучения

Развитие технологии производства детекторов открывает возможности для новых областей применения и повышения качества визуализации. Это в свою очередь обуславливает необходимость использования источников рентгеновского излучения более высокого качества. Одним из необходимых требований является стабильность дозы рентгеновского излучения, что во многом зависит от рабочей температуры рентгеновской трубки. Изменение температуры трубки может составлять более 10 %. На рис. 12 приведена схема для лучшего понимания этого процесса.

Применение аналоговой компенсации температуры вместе с цифровой оценкой параметров и компенсацией позволяет уменьшить это существенное отклонение дозы до пренебрежимо малого уровня. На рис. 13 представлены эксплуатационные характеристики оптимизированного источника рентгеновского излучения. Здесь показано максимальное отклонение, скомпенсированное до уровня ниже 0,4 %.

На графиках представлены сумма фотонов низкой и высо-

кой энергии (фиолетовая кривая – пропорционально эквивалентной стабильности тока, мА) и отношение фотонов высокой и низкой энергии (синяя кривая – пропорционально эквивалентной стабильности напряжения, кВ).

Потеря дозы в результате снижения мощности

Если выходная мощность трубки мгновенно теряется, на поверхности мишени анода произойдет резкое падение температуры, что приведет к созданию механического напряжения на поверхностном слое. Это может вызвать образование трещин на поверхности мишени, деградацию фокусного пятна и потерю дозы рентгеновского излучения. После 10 000 циклов относительная потеря дозы может составлять 80 % от начальной дозы. Работа с уровнем мощности на 20 % ниже максимальных значений или реализация плавного снижения мощности в работе генератора может значительно сократить механическое напряжение на поверхности мишени.

Заключение

По мере развития промышленных технологий визуализации и повышения требований к источникам рентгеновского излучения все более важным ста-

новится совместное использование трубок и генераторов для обеспечения их высокой производительности, надежности и низкой стоимости. Для того чтобы даже самые лучшие рентгеновские трубки показывали максимальную производительность и были защищены от типичных причин отказа, необходимо использовать качественные генераторы.

Было бы ошибочным недооценивать важность использования генератора, разработанного с учетом требований рентгеновской трубки. Как отмечалось выше, полезный срок службы рентгеновской трубки устанавливается с учетом известных неизбежных причин отказа. При выборе компонентов системы визуализации следует всегда уделять первоочередное внимание генератору, обеспечивающему длительный ресурс и высокие эксплуатационные характеристики рентгеновских трубок, т.е. генератор должен быть надежным, универсальным, простым в эксплуатации и иметь невысокую стоимость.

За дополнительной информацией обращайтесь в представительство компании Spellman High Voltage Electronics Corporation — Россия и СНГ

www.spellmanhv.ru
+7 (496) 465 92 40

Ответы на кроссворд

По горизонтали: 2. Дуэт. 4. Инцидент. 10. Синхронизатор. 11. Отказ. 12. Шаг. 15. Разъем. 16. Сбой. 19. Дефектограмма. 22. Плена. 23. Наводка. 25. Риска. 26. Сканер. 27. Зона.

По вертикали: 1. Фильтр. 2. Дефект. 3. Жесткость. 5. Авария. 6. Фаза. 9. Анализ. 12. Шум. 13. Гистерезис. 14. Помеха. 17. Развертка. 18. Усиление. 20. Твердомер. 21. Генератор. 22. Подрез. 24. Дисплей.