

О ВЛИЯНИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МОДУЛЯТОРНЫХ ЛАМП

Л. А. Варакин, Ю. И. Есиков, П. В. Пошехонов

Рязань

Высоковольтные модуляторные лампы весьма существенно отличаются по электрической прочности от простых вакуумных промежутков. Так, например, промежуток, составленный из плоских молибденовых электродов с расстоянием в 10 мм, пробивается напряжением 250 кв. Пробивное напряжение такой же длины промежутка между анодом лампы и ближайшим к нему электродом, электронной сеткой, составляет всего 30—50 кв.

Исследования, проведенные на ряде электровакуумных предприятий, показали, что снижение прочности происходит вследствие целого ряда одновременно действующих факторов: высокой температуры электродов, их запыленности продуктами испарения оксидного катода, своеобразной конфигурации электродов, наличия изоляторов и т. д. Установлен ряд факторов, связанных с режимом работы лампы. За время прохождения импульса анодного тока, из-за его малой плотности ($2-3 \text{ а/см}^2$) искрение катода, как инициатора пробоя, исключается. С другой стороны, обнаружено влияние на электрическую прочность параметров импульса. С помощью специальных счетчиков было установлено, что определенная часть пробоев непосредственно связана с прохождением импульса тока. Можно было бы считать, что это обусловлено повышением температуры электродов, однако несложные расчеты показали, что как на фронте, так и в течение прохождения импульса тока импульсная температура электродов не превышает нескольких градусов.

По всей видимости, наблюдаемый эффект связан с появлением в лампе заряженных частиц-положительных ионов [1]. Некоторую ясность в понимании механизма появления ионов и их влияния на пробой мог бы дать эксперимент по установлению зависимости электрической прочности лампы от длительности импульса тока. В частности, такой эксперимент позволил бы судить о том, связано ли появление ионов с бомбардировкой анода электронами заднего фронта импульса тока, когда анод бомбардируется электронами высокой энергии, или же на выход ионов главным образом влияет продолжительность бомбардировки благодаря возрастающему выделению газа в процессе самой бомбардировки. Следует отметить, что непосредственные измерения ионных токов в динамическом режиме работы лампы по очевидным соображениям практически невозможны. Поэтому всякая проверка предположения о роли ионов в развитии пробоя может быть выполнена лишь косвенными экспериментами.

Опыт проводился на нетренированных лампах типа ГМИ-90. Схема испытания не отличалась от обычных схем модуляторов с частичным

разрядом накопительной емкости (рис. 1). При изменении длительности импульса тока τ частота посылок импульсов f изменялась таким образом, что произведение τf оставалось постоянным. Это обеспечивало постоянство средней величины рассеиваемой мощности, а следовательно, и температуры электродов лампы. Изменению длительности импульса в диапазоне 2—8 мксек соответствовало изменение частоты посылок в 500—125 гц. В процессе длительного (130 ч) испытания лампы через каждые 20 мин

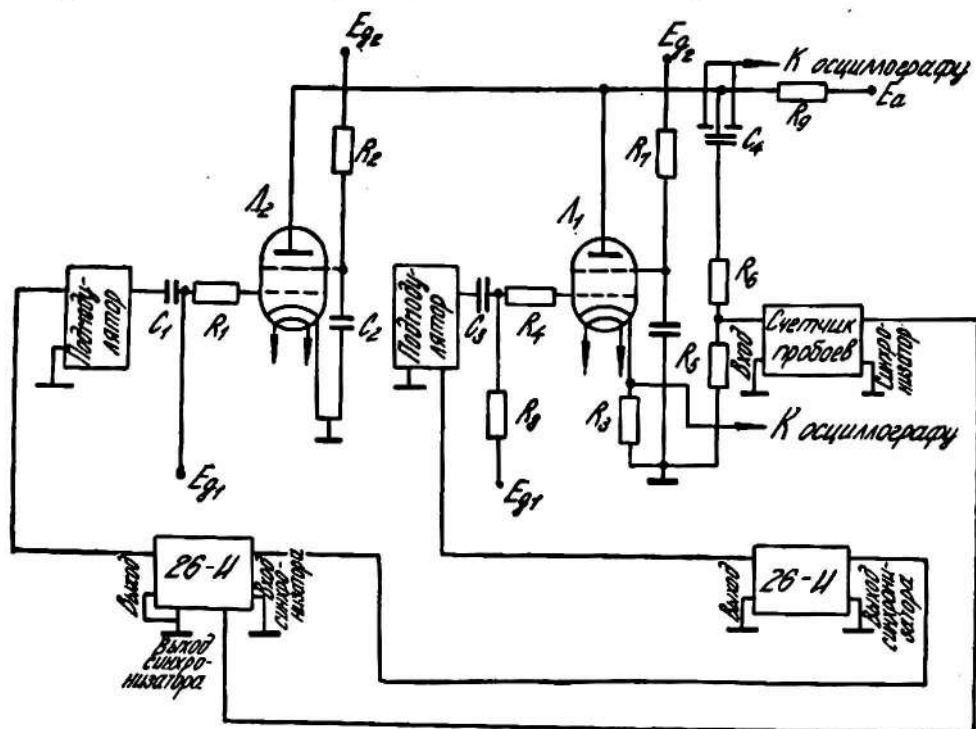


Рис. 1. Экспериментальная схема установки.

изменялся режим ее работы, через каждый час цикл испытания повторялся, тем самым обеспечивалась независимость результатов эксперимента от постепенной тренируемости лампы. Электрическая прочность оценивалась по количеству пробоев, суммированных за весь цикл испытаний для каждой длительности импульса.

Для подсчета пробоев был использован двухканальный счетчик на декатронах. По первому каналу регистрировались все пробои, по второму — только те из них, которые развивались спустя 50 мксек после прохождения импульса (пробои в паузу между импульсами — n_p). Как видно из приведенных кривых (рис. 2), с увеличением длительности импульса число пробоев в лампе возрастает. Особенно резко это проявляется для пробоев, развивающихся вслед за прохождением импульса n_1 .

Полученный результат свидетельствует о существенном значении процессов, связанных с электронной бомбардировкой анода. Увеличение длительности бомбардировки приводит к усилению этих процессов и снижению электрической прочности прибора.

Можно предположить, что влияние бомбардировки сказывается прежде всего в течение ближайшего времени после прекращения импульса, когда в промежутке имеется достаточно большое количество ионов, а на

аноде действует полное напряжение источника питания E_a . Это предположение можно проверить экспериментально, создав условия в лампе, при которых анодное напряжение повышается после каждого импульса не сразу, а спустя некоторый промежуток времени τ_3 , в течение которого может произойти деионизация промежутка.

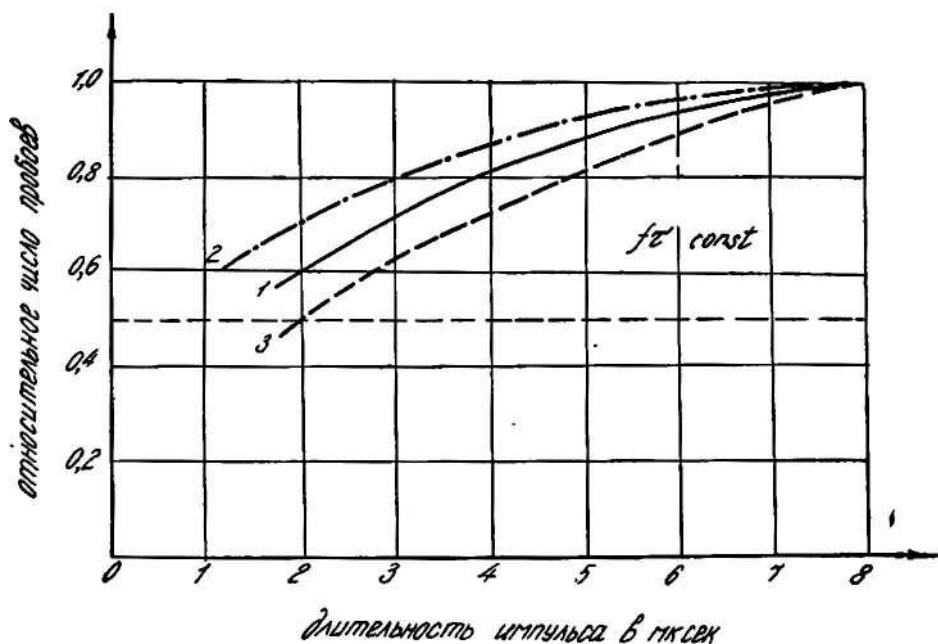


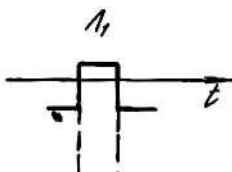

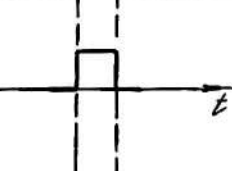
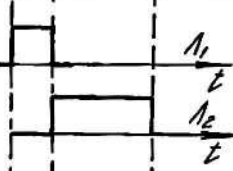
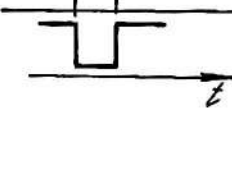
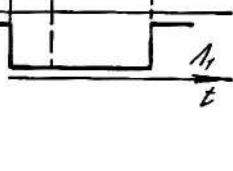
Рис. 2. Зависимость числа пробоев в лампе ГМИ-90 от длительности импульса тока:

1 — кривая изменения общего числа пробоев; 2 — в паузу между импульсами;
3 — в первые 50 мксек после прекращения импульса.

В соответствии с этими соображениями необходимое понижение напряжения в описываемом ниже эксперименте достигалось благодаря тому, что исследуемая лампа L_2 (рис. 1) включалась в испытательную схему параллельно с более электропрочной лампой L_1 . Обе лампы работали поочередно на общую нагрузку R_0 таким образом, что по прекращении тока через лампу L_2 открывалась лампа L_1 . Тем самым повышение анодного напряжения на испытуемой лампе после прохождения импульса тока искусственно задерживалось на величину длительности импульса тока вспомогательной лампы τ_3 (табл. 1).

Совмещение заднего фронта импульса лампы L_2 с передним фронтом импульса лампы L_1 обеспечивалось тем, что отпирающие импульсы на управляющие сетки обеих ламп подавались от отдельных подмодуляторов, импульсы запуска которых снимались с двух генераторов И-26. Один из них работал в режиме ждущего запуска с задержкой по выходу на время длительности импульса исследуемой лампы L_2 . Совмещение и форма импульсов контролировались осциллографом СИ-1 и были вполне удовлетворительными. В качестве вспомогательной лампы L_1 была выбрана хорошо тренированная лампа ГМИ-90. Исследовались нетренированные лампы ГМИ-83, ГМИ-5, ГМИ-10 ГМИ-90. Длительность импульса исследуемых ламп составляла 2 мксек, вспомогательной лампы — 5 мксек при частоте посылок 500 гц.

Таблица 1

Наблюдаемый параметр	Режим А	Режим Б
Импульс напряжения на управляющей сетке		
Импульсный анодный ток		
Анодное напряжение		

Эксперимент проводился следующим образом. В процессе длительного (30—50 ч) испытания через каждые 30 мин устанавливался либо специальный (табл. 1 — режим Б), либо нормальный режим работы лампы (режим А). В последнем случае вспомогательная лампа отключалась. Через каждый час цикл испытаний повторялся. Электрическая прочность оценивалась по количеству пробоев в лампе за все время испытания по элементам цикла. В табл. 2 даны результаты проведенного эксперимента.

Таблица 2

Тип лампы	Режим А		Режим Б		Время работы лампы, ч
	n_i	n_p	n_i	n_p	
ГМИ-83	6,3	4,5	0,75	1,85	32
ГМИ-5	1,7	1,25	0,36	0,54	44
ГМИ-10	1,37	0,56	0,37	0,25	64
ГМИ-90	4,5	3,7	1,2	1,3	50

Примечание. n_p — усредненное количество пробоев в паузе между импульсами за 1 ч;

n_i — усредненное число пробоев, зарегистрированных в течение 50 мксек после окончания импульса.

Из анализа результатов испытания следует, что если анодное напряжение лампы после прохождения через нее импульса тока остается в течение 5 мксек таким же, как и во время прохождения импульса (режим Б), то наблюдается резкое снижение общего числа пробоев. Примечательным оказывается тот факт, что наряду с существенным снижением пробоев за импульсом n_i наблюдается некоторое снижение числа пробоев в паузу между импульсами n_p .

Проведенные эксперименты свидетельствуют о наличии в высоковольтных модуляторных лампах так называемого «анодного эффекта», согласно которому весьма существенным для развития пробоя являются процессы, происходящие на поверхности положительного электрода. Бомбардирующие анод электроны, не принимая непосредственного участия в развитии предпробойных процессов, являются причиной, «развязывающей» эти процессы. Возможно, что в результате электронной бомбардировки поверхность анода становится более активным источником положительных ионов, которые непосредственно и определяют дальнейшее развитие предпробойных процессов. Известно, что даже абсолютно чистая поверхность в условиях технического вакуума (10^{-4} мм рт. ст.) покрывается с течением времени слоем газа. На электродах появляется постоянно нарастающая пленка, содержащая углерод [2]. В модуляторных лампах процесс загрязнения в значительной мере усиливается постоянным напылением продуктов испарения оксидного катода. При электронной бомбардировке анода происходит разложение пленки с выделением достаточно большого количества газа и его последующей ионизацией электронами вблизи поверхности анода. При этом возможно и непосредственное выделение ионов с поверхности анода [3].

Если принять получающую в настоящее время все более широкое признание точку зрения, что пробой развивается вследствие прогрессивно нарастающего автоэлектронного тока, то роль положительных ионов, вероятно всего, должна сводиться к усилению поля у эмиттера. Согласно работам [4—5], такое усиление происходит благодаря существованию объемного положительного заряда между электродами.

А. Мейтланд [6], изучая скорость восстановления изоляционных свойств вакуумного промежутка после пробоя, пришел к выводу, что ухудшение прочности промежутка после пробоя связано с появлением положительных зарядов на диэлектрических включениях, всегда имеющих на поверхности катода. Эти заряды вызывают появление автоэлектронного тока в соответствии с эффектом Молтера, что объясняет сравнительно долгое время, в течение которого промежуток остается в состоянии пониженной электрической прочности. Минимальной электрической прочностью наблюдалась в течение первых 5 мксек после пробоя.

Результаты данной работы укладываются в рамки предположений А. Мейтланда. Если импульс тока рассматривать как своеобразный пробой, после которого отдельные точки катода становятся центрами автоэлектронного тока, то понижение анодного напряжения на время, когда эти центры наиболее активны (3—5 мксек), позволяет предотвратить развитие предпробойных процессов, что приводит к резкому снижению числа пробоев в лампе. Уменьшение пробоев, являющихся следствием прохождения импульса тока, должно приводить к уменьшению числа пробоев и в паузу между импульсами, поскольку для полного восстановления электрической прочности требуется сравнительно долгое время, измеряемое многими сотнями микросекунд. Поэтому пробой в лампе часто наблюдаются не в виде одиночных, а в виде серии следующих друг за другом.

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы. При работе импульсной высоковольтной электронной лампы с оксидным катодом ее электрическая прочность существенно зависит от процессов, которые протекают в ней после бомбардировки поверхности анода электронами тока рабочего импульса. Лампа в течение нескольких микросекунд после прохождения импульса остается в состоянии резко пониженной электрической прочности. Прочность лампы снижается с увеличением длительности

импульса в значительно большей мере, чем при соответствующем повышении частоты посылок.

Предполагается, что электронная бомбардировка анода связана с образованием положительных ионов, которые и определяют в дальнейшем развитие пробоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. В. Пошехонов, Л. А. Варакин, О. В. Потемкин, Б. А. Самышкин. Пробой в высоковольтных модуляторных лампах с оксидным катодом. Труды Рязанского радиотехнического института, т. V, серия «Электроника».
2. A. E. Ennos. The Origin of Specimen Contamination in the Electron microscope. Br. J. Appl. Phys. V. 4, pp. 101 (1953).
3. P. Wargof and W. G. Shepherd. Electron-Bombardment-Induced Dissociation of Alkaline Earth Oxides Phys Rev. V. 106. № 4, pp. 695 (1957).
4. W. S. Boyle, P. Kisliuk and L. H. Germer. Electrical Breakdown in High vacuum. I. Appl. Phys. V. 26. № 6 (1953).
5. И. Н. Сливков. Иницирование электрического пробоя в вакууме автоэлектронным током. ЖТФ, т. XXXVI, вып. 2, стр. 342 (1966).
6. A. Meitland. Recovery of the insulating property of a vacuum gap after breakdown caused by a 4,5 μ sec pulse. Br. J. Appl. Phys., V. 13, pp. 41 (1962).