

# Поведение высоковольтного кабеля источника питания при коротком замыкании и связанные явления. Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). Труды по диэлектрикам и электрической изоляции

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo), Костел Карп (Costel Carp)  
и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)

Spellman High Voltage Electronics Corporation  
475 Wireless Blvd.  
Hauppauge NY 11788, USA

## КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ

Разрядка при напряжениях, близких к предельным рабочим, неизбежна во многих высоковольтных нагрузках. Такими нагрузками могут быть, например, вакуумные промежутки рентгеновских трубок. В случае вакуумного промежутка характеристики разрядки зависят не только от состояния нагрузки, но и от внешних цепей. В кабельных соединениях важна длина кабеля. Длинные кабели способны уменьшать пробивное напряжение, что в литературе обыкновенно игнорируется. Рассмотрены отобранные экспериментальные данные и средства улучшения эксплуатационных характеристик. В зависимости от способов кабельных соединений рассмотрены два случая. В первом, постоянном соединении, кабельный экран на обеих сторонах соединен с землей. Поэтому происходящие в кабеле процессы можно описывать обычными уравнениями для длинных линий. Форма колебаний бегущих волн, развивающихся на стороне источника питания в условиях коротких замыканий и перенапряжений (OV), представляется в функции параметров кабеля. Во втором случае экран на стороне источника питания заземлен, а на стороне нагрузки он не присоединен (соединение с незаделанным экраном). Показано, что обычная модель двухпроводной линии передачи больше не применима. Средствами PSpice выполнены разработка и анализ эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами.

Показано, что изоляция кабеля подвергается перегрузкам на стороне нагрузки в соединениях с незаделанным экраном, и на стороне источника питания в постоянных соединениях. Представлены экспериментальные результаты, полученные на низковольтных моделях.

Ключевые слова: высоковольтный кабель, изоляция, короткое замыкание, перенапряжения, рентгеновская трубка

## 1 ВВЕДЕНИЕ

### 1.1 Общие сведения

Разряды в высоковольтных нагрузках при напряжениях, близких к их предельным рабочим значениям практически неизбежны. В состав таких нагрузок могут входить вакуумные приборы, в частности рентгеновские трубки. Характеристики разряда зависят не только от нагрузки, но и в значительной степени от внешних цепей, а именно от соединенной непосредственно с нагрузкой емкости или ограничительного импеданса, если он имеется. Влияние внешней цепи наиболее сильно проявляется в случае нагрузки с вакуумным прибором; оно сказывается намного меньше, если в составе нагрузки используются приборы, содержащие газ при атмосферном давлении.

Очень часто нагрузку соединяют с источником высоковольтного питания (HVPS) посредством длинного высоковольтного кабеля. Экран кабеля может быть заземлен а) на обеих сторонах или б) только на стороне высоковольтного источника питания. Последнее мы будем называть «соединением с незаделанным экраном». Для ясности отметим, что в этой статье рассматриваются только коаксиальные кабели. К этой категории также относятся кабели с несколькими внутренними проводниками, которые могут использоваться для питания цепей накала и сетки. Для случая а) происходящие в кабеле процессы можно описывать обычными уравнениями для длинных линий (см., например, [1], [2]). Далее будет показано, что для соединений с незаделанным экраном эти уравнения в обычном виде неприменимы. Нам неизвестны публикации с анализом таких соединений.

## 1.2 Нагрузка с вакуумным прибором

Как отмечено выше, мы выбираем вакуумные промежутки по причине наибольшей чувствительности их характеристик разрядки к схеме питания. Авторы хорошо осведомлены о рентгеновских трубках и их высоковольтных источниках питания; поэтому далее рассмотрены в основном эти устройства.

Хотя теория разрядки в вакууме далека от завершенности [3]–[8], с точки зрения электромагнитных помех (ЭМП) мы будем различать а) микроразряды и б) искровые разряды. (Здесь в основном используется терминология [3], [8].) Первые характеризуются незначительными падениями напряжения, тогда как искровой разряд полностью разряжает соединенные с нагрузкой емкости. Будем называть сумму этих емкостей «выходной емкостью»,  $C_{out}$ . Если высоковольтный источник питания не ограничивает ток до определенного уровня или не выключается, искровой разряд может переходить в дуговой.

Микроразряды могут быть слабыми (миллиамперы) и, как таковые, не вызывать серьезные неисправности. Однако более интенсивные микроразряды также обычны [3] (см. также [8] стр. 24). Напряжении нагрузки полностью не пропадает, но паразитные токи разрядки являются намного более значительными, превышая уровни амперов, и могут приводить к сбоям в работе чувствительных электронных приборов [9]. Микроразряды в рентгеновских трубках часто связаны с наличием остаточного газа.

Искровые разряды связаны с короткими пикосекундными импульсами тока, амплитуда которых может достигать нескольких кА. Время нарастания тока зависит от скорости образования моста при прохождении фронта плазмы в промежутке. В настоящее время существует сложившееся на основании большого объема экспериментальной работы общее мнение, что для промежутков сантиметровой длины эта скорость обычно составляет 2 см/пс. Исходя из вышеизложенного, время «закрытия» вакуумного промежутка можно оценить с высокой достоверной вероятностью; время нарастания тока, очевидно, короче и зависит также от непосредственно связанной с электродами емкости  $C_{out}$ . Амплитуда тока  $I_m$  возрастает вместе с  $C_{out}$  и, согласно одной из популярных теорий, начиная с некоторого значения  $C_{out}$  приблизительно пропорциональна  $C_{out}^2$ :  $I_m \sim C_{out}^2$  [10].

Отметим, что в жидких и твердых диэлектриках пробой развивается намного быстрее, чем в вакууме. Это также справедливо для газов при относительно высоком давлении. Например, в воздухе при атмосферном давлении и выше мосты в промежутках средней длины образуются значительно быстрее вследствие высокой скорости стримерного распространения (порядка  $10^7$ – $10^8$  см/с при атмосферном давлении, в зависимости от параметров промежутка и напряжения; см., например, [11], [12] и их библиографию) и более быстрого развития искрового разряда.

Еще одной важной особенностью искрового пробоя в вакууме является уменьшение напряжения пробоя  $V_{br}$  с увеличением  $C_{out}$ . При использовании в рентгеновских установках длинных высоковольтных кабелей падение  $V_{br}$  сильно заметно. Мы наблюдали, например, что для трубки с номиналом 70 кВ и 15-метрового кабеля с резиновой изоляцией  $V_{br}$  падало с 70 кВ до значения ниже 55 кВ. Для других трубок  $V_{br}$

составило 25–35 кВ и 45–50 кВ с кабелями длиной 9 м и 3 м соответственно [9].

Убедительное доказательство влияния внешней схемы на пробивное напряжение вакуумного промежутка дано в [3] (см. также [13]). Обнаружено, что даже небольшое сопротивление, разделяющее  $C_{out}$  и промежуток, увеличивает  $V_{br}$  на десятки процентов. Снижение запасаемой энергии также благоприятно действовало на электрическую прочность диэлектрика промежутков в *определенных условиях*. Наша экспериментальная работа согласуется с этими данными (см. раздел 4).

## 1.3 Влияние длины высоковольтного кабеля на электромагнитные процессы

Для учета влияния высоковольтного кабеля на электромагнитные процессы простейшим приближением является представление кабеля в виде паразитной емкости. Это упрощение работает весьма хорошо для почти всех случаев, кроме коротких переходных явлений; причина последнего заключается в том, что электрическая длина кабеля может быть соизмерима со временем поверхностного перекрытия промежутка. В этом случае правильнее представлять кабель в виде длинной линии с характеристическим импедансом  $Z$  и скоростью распространения  $v$  (потерями можно пренебречь, если кабель не очень длинный). Скорость распространения равна  $v = c/\sqrt{\epsilon}$ , где  $\epsilon$  есть относительная диэлектрическая проницаемость кабельной изоляции при условии, что кабель не содержит ферромагнитные материалы;  $c$  — скорость света. В этом разделе приняты значения  $Z = 59$  Ом и  $\epsilon = 3,15$ . Первое взято из технических характеристик кабеля 2042 Dielectric Sciences [14], второе есть значение, вычисляемое исходя из емкости и геометрии кабеля, для этого же кабеля. Таким образом, для прохождения 1 м в кабеле 2042 волне необходимо время, равное  $\tau = 5,3$  нс.

Для короткого кабеля все переходные процессы могут затухать до образования в промежутке плазменного моста, и разряд может не переходить в искровой. Для более длинных кабелей имеется больше времени для распространения плазмы в условиях поддержания за счет энергии в кабеле. Рассмотрим пример. Для типичного для некоторых рентгеновских трубок номиналом 150 кВ промежутка 2 см необходимое для полного образования плазменного моста время составляет ~1 пс, и оно значительно меньше для газовых промежутков при атмосферном давлении и выше. Время нарастания тока значительно короче [3], [6]–[8]. Кабель длиной 3 м способен поддерживать разряд в течение всего  $3\tau \approx 16$  нс, тогда как для кабеля длиной 15 м этот интервал составляет 79 нс. Отметим, что трехметровый кабель может быть «коротким» для нагрузки с вакуумным прибором, но быть достаточно «длинным» для нагрузки с разрядом в газе высокого давления. Эти аргументы, хотя и слишком упрощенно, указывают на решающее значение длины кабеля.

Отметим, что кабель ограничивает ток разрядки до значения  $I_m = V/Z$ , где  $V$  — напряжение зарядки.

Само по себе присутствие длинных высоковольтных кабелей имеет огромное влияние на диэлектрическое поведение высоковольтных нагрузок, особенно вакуумных промежутков, а также на происходящие в результате пробоя нагрузки перенапряжения в высоковольтных источниках питания. Характер и абсолютное значение перенапряжения зависят от метода кабельного соединения. Эти факторы, обыкновенно игнорируемые в литературе, рассмотрены в следующих разделах (см. также [15]).

## 2 ОСНОВНОЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ЗАЗЕМЛЕННЫМ ЭКРАНОМ НА ОБОИХ КОНЦАХ (ПОСТОЯННОЕ СОЕДИНЕНИЕ)

Во многих высоковольтных системах экран кабеля заземлен на обоих концах. Тогда если нагрузка замкнута накоротко, кабель разряжается таким образом, что и напряжение, и ток отражаются от обоих концов с изменениями полярности. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет рассеяна вся энергия, главным образом в виде тепла. Этот случай имеет аналитическое решение, которое можно найти в другом источнике [16], [17]. Мы используем модели PSpice. Многократные отражения иллюстрируются формами колебаний на рисунке 1. Здесь мы принимаем, что заряжающий источник питания V1 изолирован от кабеля, что типично для высоковольтных источников питания, снабженных средствами ограничения дугового разряда. Примечательно, что напряжение в кабеле начинает содержать высокочастотную составляющую, вредную для изоляции.

Отражения менее интенсивны, если линия короче, и (или) время перехода больше. Они исчезают после некоторой критической длины, в этом случае меньше 3 м. На рисунке 2 показана зависимость пикового напряжения при изменениях полярности и пикового тока разрядки в зависимости от длины кабеля (относится к напряжению зарядки 100 кВ). Видно, что при большей длине пиковое напряжение при изменениях полярности и максимальный ток разрядки приближаются к своим теоретическим предельным значениям.

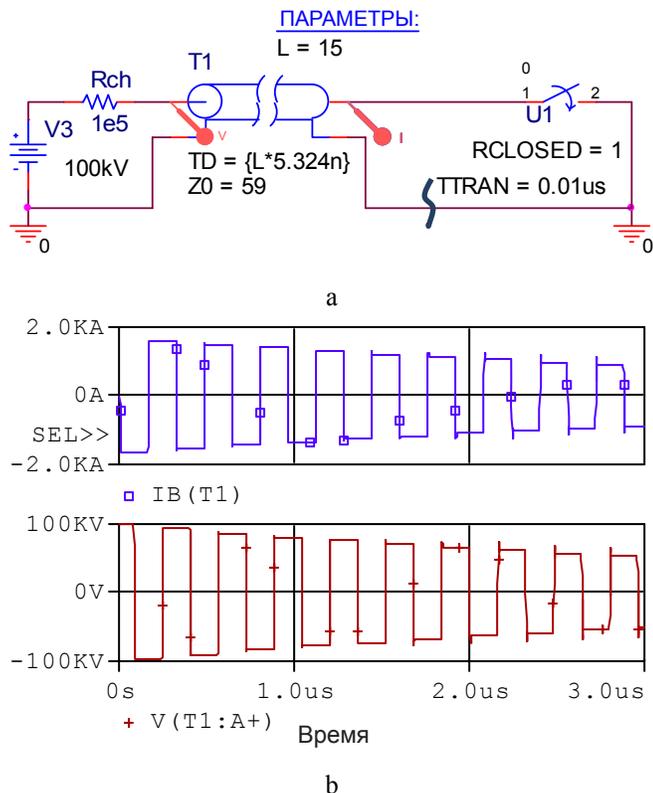


Рисунок 1. а — модель PSpice для разрядки 15-метрового кабеля 2042 в цепь короткого замыкания. Время закрытия/переходного процесса переключателя, TTRAN, является параметром PSpice; оно намного короче, чем электрическая длина кабеля. б — диаграммы синхронизации. Амплитуда тока равна V/Z

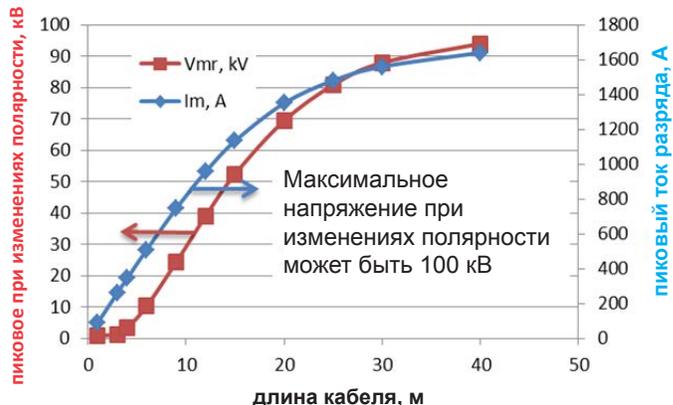


Рисунок 2. Зависимость пикового напряжения при изменениях полярности и пикового тока разрядки (V(T1:A+) и IB(T1) соответственно, по обозначениям на рисунке 1) от длины кабеля (относится к напряжению зарядки 100 кВ). В этих моделях время закрытия/переходного процесса переключателя TTRAN = 1 мкс (фактический переход от 90% до 10% занимает 200 нс)

## 3 ПЕРЕХОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ С НЕЗАДЕЛАННЫМ ЭКРАНОМ

### 3.1 Теоретическая часть

Экран кабеля не заземляется на стороне нагрузки во многих применениях, например при электростатическом осаждении и ионной имплантации, а также при высоковольтных испытаниях и в общей лабораторной практике. Это происходит потому, что, несмотря на практическую важность этого случая, его анализ в доступной литературе отсутствует.

Основное предположение при получении уравнений длинной линии для двухпроводной линии передачи заключается в том, что в обоих проводниках существуют только дифференциальные токи, равные друг другу в каждой точке [1], [2], [16]. В связи с этим модели длинных линий в PSpice полагают, что это имеет место и, следовательно, стараются на одном конце вставить между экраном и землей импеданс, что приводит к абсурдным результатам. Однако соединение незаделанным экраном представляет именно такую ситуацию! Если экран оторван от земли, что на рисунке 1 изображено волнистой линией, ток в экране на этом конце нулевой, но его аналог во внутреннем проводнике не нулевой. Фактически при соединении с незаделанным экраном мы имеем дело с трехпроводной линией передачи, третьим проводником является земля. Для следующего уровня сложности отметим, что при расположении кабеля далеко от земли такая линия может не поддерживать моды поперечных электромагнитных колебаний, что означает соизмеримость поперечных расстояний с длиной волны. В таком случае экран может действовать как антенна. Однако пренебрегая токами смещения, протекающими от экрана на землю и между соседними частями самого экрана (в случае смотанного в бухту кабеля), можно оставаться в пределах удобной простоты аппроксимации двухпроводной линии. Покажем, что такое упрощение все еще позволяет анализировать характерные явления пробоа нагрузки при соединении с незаделанным экраном.

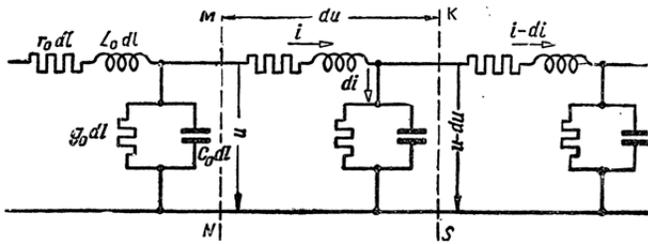


Рисунок 3. Представление двухпроводной длинной линии с сосредоточенными параметрами (взято из [16]).  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $r_0$  и  $G_0$  представляют соответственно индуктивность, емкость, сопротивление и проводимость длинной линии на единицу длины

Будем пользоваться моделью схемы с сосредоточенными параметрами, одной из причин этого является возможность такого моделирования средствами PSpice. Сначала

рассмотрим приведенную на рисунке 3 обычную эквивалентную схему, используемую для получения уравнений длинной линии. Такие схемы (цепи формирования импульсов) также применяют для генерации прямоугольных импульсов. Отметим, что возвратный проводник представлен только проводом; все импедансы сосредоточены в прямом проводнике и, следовательно, токи в обоих равные. Такую модель невозможно использовать для получения нулевого тока в изолированном экране в дальнем конце для короткозамкнутой цепи. Разделим индуктивность на две между прямым и обратным проводами так, чтобы полная индуктивность элементарной ячейки осталась прежней. На рисунке 4а показана такая модель для 10-метрового кабеля RG-58/U (потери пренебрегаем); на рисунке 4б показана модель того же кабеля в обычном представлении.

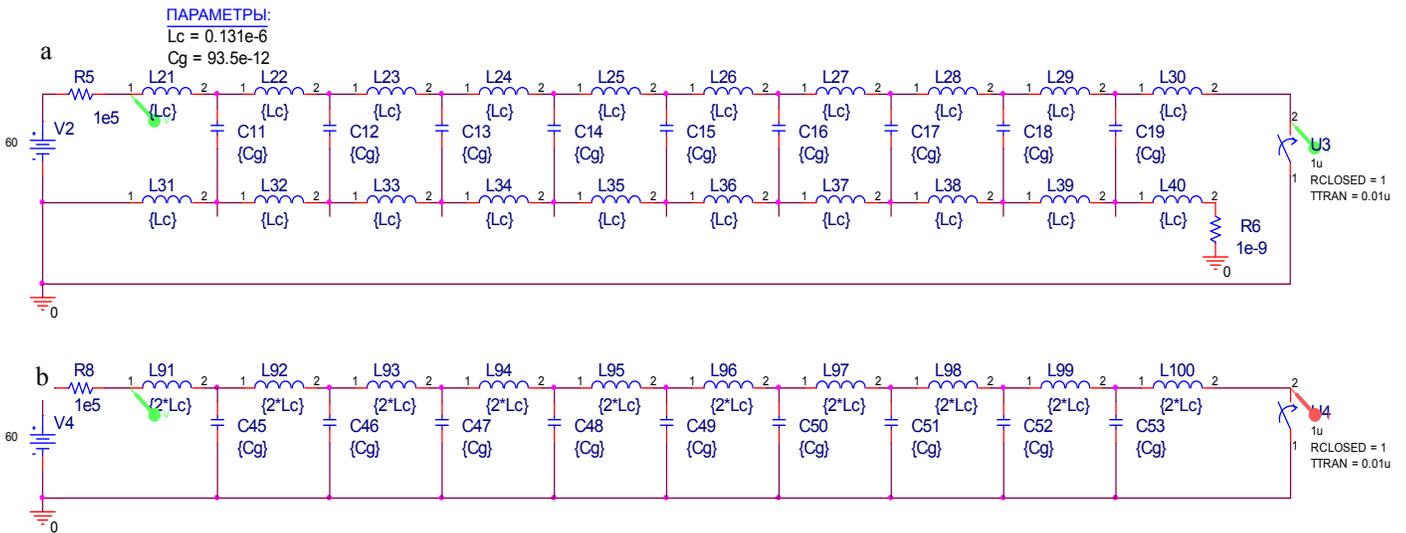


Рисунок 4. Модель с сосредоточенными параметрами для 10-метрового кабеля RG-58/U, выполненная в PSpice. а — экран изолирован на дальнем конце. Индуктивность элементарной ячейки разделена на две; б — обычная модель длинной линии без потерь. Параметры RG-58/U, взятые из каталога Belden [19]:  $L = 262$  мкГн/м,  $C = 93,5$  пФ/м

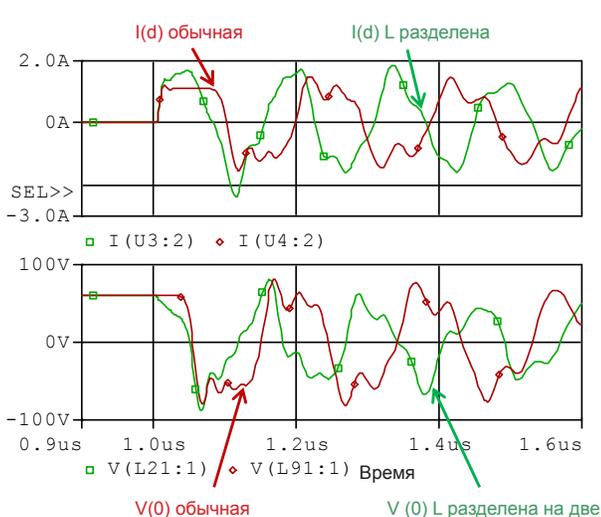


Рисунок 5. Моделирование схемы, изображенной на рисунке 4.  $R_6 = 10^{-9}$  Ом (экран заземлен на дальнем конце)

На рисунке 5 показаны результаты моделирования для цепей, изображенных на рисунках 4а, б для  $R_6 = 10^{-9}$  Ом, т.е. экран заземлен на дальнем конце. Цепь на рисунке 4б

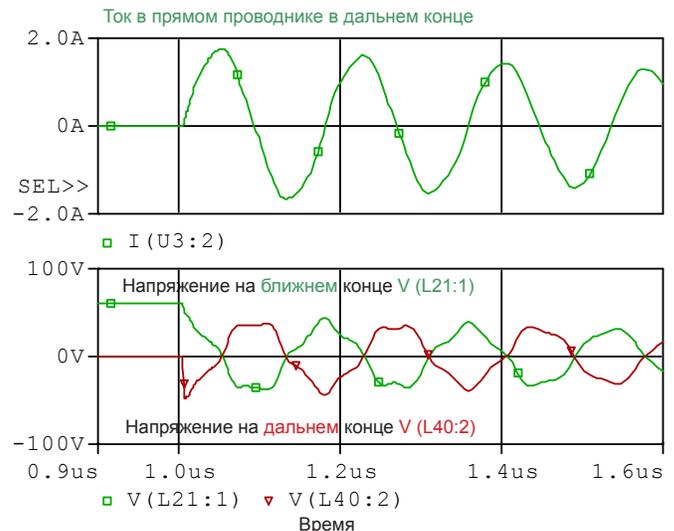


Рисунок 6. Моделирование схемы, изображенной на рисунке 4а.  $R_6 = 10^9$  Ом (экран на дальнем конце изолирован)

генерирует обычные квазипрямоугольные формы колебаний (сравните с их экспериментальными аналогами ниже), как и должно быть в любой цепи формирования импульсов.

Однако схема, изображенная на рисунке 4а, отличаясь только тем, что индуктивность элементарной ячейки разделена на две, бросает вызов здравому смыслу, генерируя колебания треугольной формы вместо прямоугольных.

На рисунке 6 показана модель для схемы, изображенной на рисунке 4а, для  $R_6 = 10^9$  Ом (соединение с незаделанным экраном). Видно, что при закрытии переключателя напряжение на экране в дальнем конце скачком возрастает до напряжения источника питания, после чего начинается колебательный процесс. Таким образом, при соединении с незаделанным экраном изоляция на обеих сторонах кабеля подвергается воздействию полных изменений полярности напряжения. Это приводит к большим перегрузкам на концах кабелей [18].

### 3.2 Экспериментальная часть

Принципиальная схема низковольтной испытательной установки показана на рисунке 7. Два отрезка кабелей RG-58 длиной приблизительно 5,5 (полная длина приблизительно 11 м, электрическая длина приблизительно 58 нс) соединенные тройником типа BNC, заряжались до 60 В через высокоомный ограничивающий резистор. Кабель был смотан в бухту и помещен на алюминиевую пластину, соединенную с системой земли. Длинная линия разряжалась на землю в циклическом режиме с использованием быстродействующего МОП-транзистора IRFD110 (фактическое время переключения с жестким запирающим без запирающего резистора было меньше 5 нс см. рисунок 8). Контроль напряжений на длинной линии осуществлялся с помощью осциллографа DPO7054 с щупами P6139A 400 МГц в трех точках: в начале длинной линии  $V(0)$ , на половинной длине  $V(d/2)$ , и на дальнем конце  $V(d)$ .

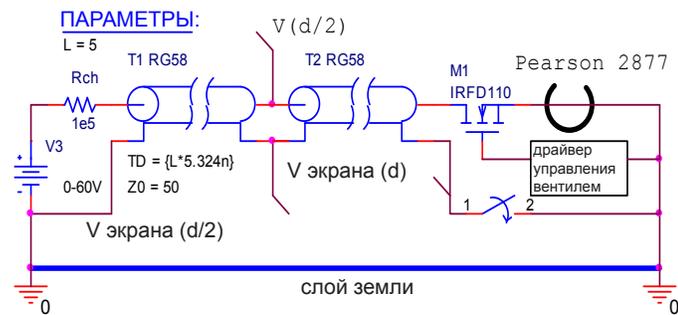


Рисунок 7. Экспериментальная схема

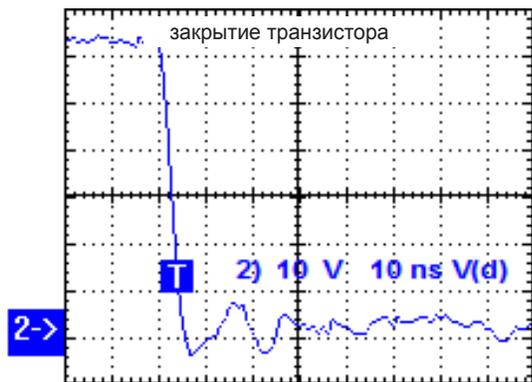


Рисунок 8. Закрытие транзистора. В пояснениях к формам колебаний здесь и далее приведены масштаб (по вертикали 10 В/дел., по горизонтали 10 нс/дел.) и легенда

Потенциал экрана в этих точках обозначен как  $V$  экрана (0),  $V$  экрана ( $d/2$ ) и  $V$  экрана ( $d$ ) соответственно. Также осуществлялся контроль тока в дальнем и (или) ближнем конце посредством трансформаторов тока Pearson 2877 и 2878 (время нарастания 2 нс и 4 нс соответственно). Отметим, что свернутый в кольцо и помещенный на заземленную пластину кабель вносит значительную емкость экрана кабеля как относительно земли, так и между соседними частями экрана непосредственно.

Опорный эксперимент заключался в коротком замыкании линии на соединенный с землей экран на дальнем конце. На рисунке 9 представлены формы колебаний с ожидаемыми квазипрямоугольными импульсами и почти полным изменением полярности напряжения и тока в ближнем и дальнем концах соответственно.

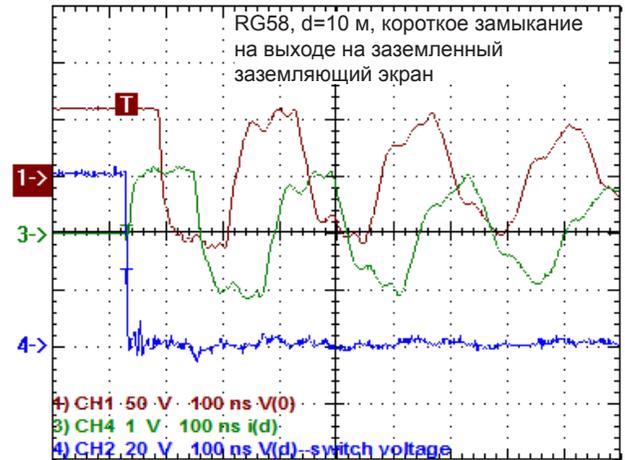


Рисунок 9. Короткое замыкание на землю, экран замкнут накоротко на ближнем и дальнем концах. Развертка 1 (Ch1) — напряжение на ближнем конце; Развертка 3 (Ch4) — ток в дальнем конце, 1 А/дел; Развертка 4 (Ch2) — напряжение на дальнем конце (напряжение переключателя). Развертка по горизонтали 100 мкс/дел.

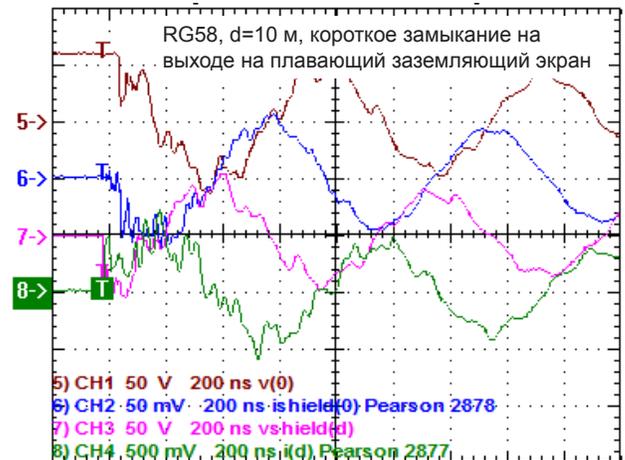


Рисунок 10. Короткое замыкание на землю, экран на дальнем конце — плавающий. Развертка 5 (Ch1) — напряжение на ближнем конце; Развертка 6 (Ch2) — ток в дальнем конце, 0,5/дел.; Развертка 7 (Ch3) — напряжение на экране на дальнем конце; Развертка 8 (Ch4) — ток в дальнем конце, 0,5/дел.; Развертка по горизонтали 200 мкс/дел.

Для экрана, изолированного от земли на дальнем конце, картина совершенно иная. Так как электрический заряд экрана не может исчезнуть мгновенно, полное напряжение на линии генерируется между экраном и землей на дальнем конце. На этом конце бегущие волны с полной сменой полярности напряжения затухают медленно. Поэтому если нагрузка искрит, изоляция кабеля при соединении с незаделанным экраном подвергается пагубному воздействию. Как показано в [18], изоляция в конце экрана чрезвычайно уязвима, и, несомненно, страдает от высокочастотных составляющих напряжения. Экран также может искрить на землю, создавая интенсивные ЭМП, усугубляемые тем, что контур тока разрядки обычно бывает большим. Излучаемое поле может вызывать пагубные результаты на системном уровне. Подробный анализ этих влияний выходит за рамки настоящей статьи.

#### 4 СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Обычно в высоковольтных источниках питания предусматривают ограничители дугового разряда на выходе перед высоковольтным кабелем. При разряде энергии, запасенной в выходных каскадах высоковольтного источника питания, они ограничивают возникающий ток до уровня, безопасного как для нагрузки, так и для самого источника питания. В самом простом случае ограничитель дугового разряда представляет высоковольтный резистор. Более сложные ограничители, состоящие из индуктивностей, резисторов и т. п., также находят применение, особенно в высоковольтных источниках питания с высоким током. Однако обычные ограничители не предотвращают поток энергии от кабеля, который уменьшает  $V_{br}$ , как отмечено в предыдущих разделах. Очевидным решением этой проблемы была бы установка токоограничительного устройства между кабелем и нагрузкой. Здесь существуют технические трудности двух видов. Во-первых, крайняя ограниченность пространства. Во-вторых, питание нити накала в рентгеновской установке обычно осуществляется высокочастотным током, и ограничитель должен пропускать ток нити без создания чрезмерно высокого падения напряжения и потерь мощности.

Средства увеличения пробивного напряжения рентгеновской трубки с питанием от высоковольтного источника питания через длинный кабель показаны на рисунке 11. Электрическая и механическая разработка ограничителя, его выполнение и испытания описаны в [9], [20]; смотрите также в [21] еще одно схемное решение. В одном из рентгеновских генераторов двухобмоточный дроссель диаметром 35 мм и длиной 40 мм имел индуктивность  $L_{ch} = 200$  мкГн (измерена для одной обмотки). Он представлял очень низкий импеданс для тока нити накала, но высокий импеданс для токов разрядки. Принимая значение характеристической частоты последнего  $f = 1$  МГц, что соответствует времени нарастания порядка долей микросекунды, вычисляем  $Z = 2\pi f Z_{ch} = 1,256$  кОм. (Подобные и даже более низкие значения сопротивления были очень эффективны при подавлении пробоя в вакууме [3].) Дроссель был установлен в экране трубки между втулкой кабельного ввода и трубкой. Он практически исключил микроразряды в трубке, которые в иных случаях серьезно дестабилизировали ее работу. Косвенно эффективность

ограничения тока можно оценить с помощью измерительного электромагнитного датчика с рамочной антенной приблизительно  $500 \text{ см}^2$ , помещаемой в непосредственной близости от высоковольтного кабеля. Без дросселя типичный выходной сигнал равнялся 10 В, а с дросселем амплитуда падала на два порядка, и частота событий была также на порядки ниже.

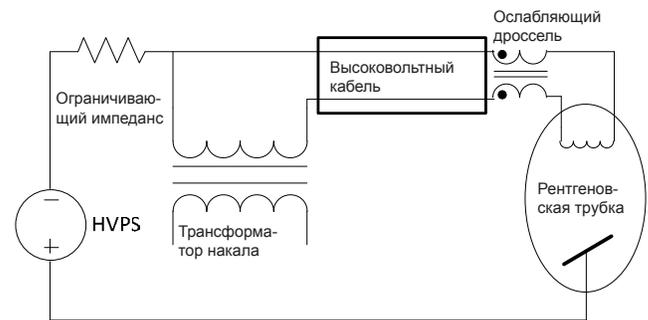


Рисунок 11. Сифазно включенный дроссель в качестве ограничителя дугового разряда в высоковольтном источнике питания рентгеновской установки

#### 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектировщик должен быть осведомлен о сложностях, связанных с длинными высоковольтными кабелями. Эти сложности заключаются в низком пробивном напряжении, высоких разрушающих нагрузках на изоляцию и высоких ЭМП. Если последнее более очевидно (чем больше запасаемая энергия, тем выше токи разрядки), то первым двум факторам обычно не придают значения.
2. При использовании постоянного соединения длинных высоковольтных кабелей изоляция подвергается перегрузкам вследствие быстрых изменений полярности напряжения на стороне высоковольтного источника питания.
3. При соединении с незаделанным экраном явления в короткозамкнутой цепи не вполне описываются уравнениями длинной линии; изоляция кабеля подвергается перенапряжениям вследствие быстрых изменений полярности напряжения на стороне нагрузки. В этом случае, если используется длинный кабель, заделку его конца нужно проектировать более тщательно по сравнению с постоянным соединением.
4. Пробивное напряжение нагрузки можно значительно увеличить путем включения низкого импеданса между кабелем и нагрузкой. Для нагрузок с потреблением высокого тока весьма эффективны индукторы с небольшими значениями индуктивности (десятки — сотни пГн).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] G. Miano and A. Maffucci, *Transmission Lines and Lumped Circuits*, Academic Press, NY, 2001.
- [2] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, Wiley, NY, USA, 2008.
- [3] I.N. Slivkov, *Electrical Breakdown of Vacuum*, Energoatomizdat, Moscow, Russia, 1972 (In Russian).
- [4] J.M. Lafferty, Ed., *Vacuum Arcs*, Wiley, 1980.
- [5] R.L. Boxman, D. M. Sanders and P. J. Martin, Editors, *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*, Noyes Publications, NJ, USA, 1995.

- [6] G.A. Mesyats, "Ectons". In three parts, Nauka, Ekaterinburg, 1993 (in Russian).
- [7] G.A. Mesyats and D.I. Proskurovski, Pulsed Electrical Discharge in Vacuum", Springer-Verlag, 1989.
- [8] R. Latham, High Voltage Vacuum Insulation, Academic Press, San Diego, USA, 1995.
- [9] A. Pokryvailo, K.K. Vlasov, Yu. A. Magdin and A.N. Starchikov, "On the Electromagnetic Compatibility of High Voltage Power Supplies for X-Ray Analytical Apparatus Operating under Conditions of High Voltage Discharges", Instrumentation and Methods of X-Ray Analysis, Vol. 40, pp. 151-158, 1990.
- [10] P.T.G. Flynn, "The Discharge Mechanism in a Cold Cathode Pulsed XRay Tube", Proc. Phys. Soc. B (UK), Vol. 69, pp. 748-762, 1956.
- [11] E.M. Bazelyan and Yu.P. Raizer, Spark Discharge, CRC Press, NY, USA, 294 pp, 1998.
- [12] Yu. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer, Berlin, Germany, 1991.
- [13] R. Hackam, "Effects of voltage polarity, electric current, external resistance, number of sparkings, supply frequency, and addition of hydrogen and air on electrical breakdown in vacuum", J. Appl. Phys., Vol. 46, pp. 3789-3799, 1975.
- [14] <http://dielectricsciences.thomasnet.com/Asset/2042.pdf>
- [15] A. Pokryvailo, and C. Scapellati, "Behavior of HV Cable at Short Circuit and Related Phenomena", IEEE Int'l. Power Modulator and High Voltage Conf. (IPMHVC), San Diego, USA, Paper 3O7, 2012.
- [16] K. A. Krug, Foundations of Electrotechnics, 6th ed., Vols. 1 and 2, Gosenergoizdat, Moscow, Russia, 1946.
- [17] G. A. Mesyats "Pulsed Power and Electronics", Moscow, Nauka, 2004 (in Russian). Translation to English: Pulsed Power, Kluwer, NY, 2005.
- [18] A. Pokryvailo, C. Carp and C. Scapellati, "Comparative Testing of Simple Terminations of High Voltage Cables", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, No. 1, pp. 7-17, 2010.
- [19] RG 58/U cable <https://edesky2.belden.com/Products/index.cfm?event=showproductdetail&partid=1979>
- [20] A. Pokryvailo, and V. Resnik, "X-Ray Generator", Soviet Patent A.C.1628235, 1990.
- [21] A. Pokryvailo, and A. Starchikov, "X-Ray Generator", Soviet Patent A.C.1220141, 1985.



**Алекс Покрывайло** (М'05-SM'07) родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Soreq NRC, Yavne, Израиль, сейчас является руководителем научно-исследовательских работ в Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Его текущие и недавние работы относятся к разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, проводил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т.д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), и более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.

**Клифф Скапеллати** (М'92), фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.