

УДК 621.314

Н.А.Шидловская, член-корр. НАН Украины, **В.В.Мартынов**, канд.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

СОГЛАСОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКОЙ

Рассматриваются переходные процессы, возникающие в выходных цепях высоковольтного источника питания, подключенного отрезком линии к электронно-лучевой пушке. Показано, что параметры выходных цепей источника питания, линии соединения и длительности пробоев существенно влияют на характер переходных процессов. Предложены меры по защите выпрямительных диодов и улучшению характера переходных процессов в цепи питания электронно-лучевой пушки.

Розглядаються перехідні процеси, що виникають у вихідних ланцюгах високовольтного джерела живлення, підключеного відрізком лінії до електронно-променевої гармати. Показано, що параметри вихідних ланцюгів джерела живлення, лінії з'єднання і тривалості пробоев істотно впливають на характер перехідних процесів. Запропоновано заходи по захисту випрямних діодів і поліпшенню характеру перехідних процесів в ланцюзі живлення електронно-променевої гармати.

В настоящее время получило развитие направление по созданию источников питания для электротехнологических установок, которые можно объединить общностью характера нагрузок, к числу которых относятся различные виды газового разряда. Последние характеризуются как нелинейные нагрузки с малыми или даже отрицательными внутренними сопротивлениями, значения которых зависят от ряда факторов и могут существенно отличаться в статическом и динамическом режимах.

К этим источникам электропитания, кроме обычных требований по регулированию и стабилизации выходного напряжения или тока, предъявляются специфические требования, отражающие свойства электротехнологических установок. Это, например, обеспечение работоспособности источников питания электронно-лучевых установок при переходе тлеющего разряда в дуговой.

В электротехнологических электронно-лучевых установках используются пушки (ЭЛП) и источники питания с единичной мощностью 0,3–0,6 МВт и более [5,9]. В подобных установках, нашли применение высоковольтные источники питания с динамическим ограничением тока при коротком замыкании (КЗ) [4–6]. В этих источниках в цепь постоянного тока по низковольтной или высоковольтной стороне, которая участвует в передаче энергии в нагрузку, включается индуктивность. При нормальной работе источника, без пробоев (КЗ), дроссель (индуктивность) не оказывает влияния на режим работы пушек, источник имеет жесткую выходную характеристику. При пробое в пушке индуктивность препятствует росту тока и формированию условий для перехода тлеющего разряда в дуговую стадию [4,6].

Традиционно, или скажем так, вынужденно из-за габаритов, источники питания подобного оборудования располагаются на некотором удалении, обычно 20–50 метров, иногда и более. При ускоряющем напряжении 20–50 кВ энергия, запасенная в линии связи источника питания с ЭЛП, может составлять от единиц до нескольких десятков Дж [8]. При пробое, резком изменении импеданса нагрузки в системе «источник питания – линия связи, находящаяся под напряжением, – нагрузка» возникает переходной процесс, который может при определенных условиях привести к отказу источника питания.

На рис. 1 показана эквивалентная схема цепей питания электротехнологической установки для исследования переходных режимов при пробоях в ЭЛП. Высоковольтный источник питания с динамическим ограничением тока представлен источником тока, высоковольтный выпрямитель учтен диодом $VD1$, а конденсатор $C1$ учитывает все емкости, приведенные к выходным клеммам источника

питания. Считаем, что параметры линии связи равномерно распределены вдоль длины, поэтому, разбив условно всю линию связи на элементарные единичные участки, получим, что элементарный участок dx однородной линии имеет индуктивность $L_0 dx$, емкость $C_0 dx$, активное сопротивление $R_0 dx$ и активную проводимость $g_0 dx$. Эмиссионные возможности ЭЛП с холодным катодом на основе экспериментальных вольтамперных характеристик аппроксимируются выражением [9]

$$I = 8,6 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 \cdot U^{2,5}, \quad (1)$$

где I – ток луча (А); p – давление рабочего газа в разрядном промежутке пушки (мТорр); U – напряжение (В).

Как видно из (1), ток луча зависит от рабочего давления и напряжения на электродах ЭЛП. Разделив обе части (1) на U , найдем характер изменения нелинейного сопротивления R_n для эквивалентной схемы рис. 1

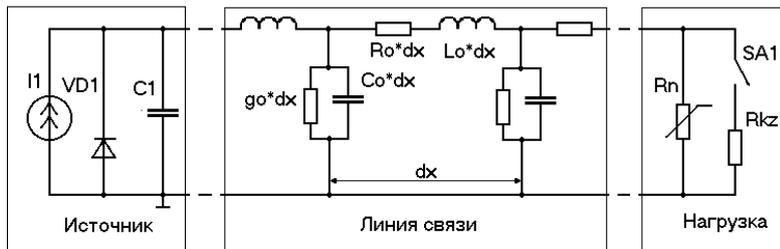


Рис. 1

эквивалентной схемы рис. 1

$$R_n = 3,6771 \cdot 10^{13} \cdot U^{-\frac{3}{2}} \cdot p^{-2}. \quad (2)$$

Пробой в нагрузке R_n учитывается отображенным на эквивалентной схеме последовательным соединением ключа SA1 и резистора R_{kz} .

Целью настоящей работы является исследование переходных процессов в линии, соединяющей высоковольтный источник питания с электронно-лучевой пушкой, и их

влияние на выходные цепи источника питания.

Рассмотрим переходной процесс только в момент КЗ в нагрузке, приняв ряд допущений. Считаем, что при КЗ ЭЛП зашунтирована весьма малым резистором и ее нелинейные характеристики не оказывают заметного влияния на происходящие процессы. Считаем, что до пробоя ЭЛП находилась в стационарном состоянии и ее можно заменить постоянным резистором, величина которого обеспечивает номинальную нагрузку для источника питания. Линию связи представим только одним звеном с параметрами $L_0 \cdot l$, $C_0 \cdot l$, $R_0 \cdot l$, что даст некоторую погрешность, которая в основном скажется только на высокочастотные составляющие переходного процесса.

К моменту возникновения КЗ начальные условия в цепи ненулевые, линия заряжена и протекает ток нагрузки. Как известно [1], расчет переходных процессов в цепях с распределенными параметрами можно свести к расчету цепи с сосредоточенными параметрами при нулевых начальных условиях, суть которого заключается в следующем. Если между какими-нибудь двумя точками линии, в общем случае заряженной, подключается двухполюсник, то для нахождения возникающего переходного процесса необходимо определить напряжение между этими точками линии до подключения двухполюсника, после чего рассчитать токи и напряжения в схеме с сосредоточенными параметрами, которая включается на это напряжение при нулевых начальных условиях. Полученные напряжения и токи накладываются на соответствующие величины предыдущего режима. Для этого (на основе принципа наложения) эквивалентную схему, показанную на рис. 1, представим в виде рис. 2.

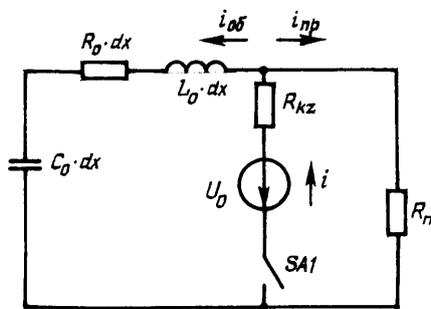


Рис. 2

Из эквивалентной схемы следует, при условии $R_{kz} = 0$ прямая волна тока равна току нагрузки, а обратная волна тока, в принципе, определяется параметрами линии. Из схемы, показанной на рис. 2, для единичной длины линии найдем

$$i_{o6} = - \frac{U_0}{L_0 \cdot C_0 \cdot p^2 + C_0 \cdot R_0 \cdot p + 1} C_0. \quad (3)$$

Переходя в (3) во временную плоскость, получим

$$i_{o6}(t) = - \frac{2U_0}{\sqrt{4 \cdot Z_0^2 - R_0^2}} \cdot e^{-\frac{R_0}{2 \cdot L_0} t} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{4 \cdot Z_0^2 - R_0^2}}{2 \cdot L_0} t \right), \quad (4)$$

где $Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$ – волновое сопротивление линии.

Если предположить, что линия без потерь, то выражение (4) приобретет вид

$$i_{обн}(t) = \frac{U_0}{Z_с} \sin \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} t. \quad (5)$$

Обратная волна тока [1] движется от места возникновения КЗ, т.е. ЭЛП, к источнику питания, увеличивая ток в выходных цепях источника питания и линии соединения. Поэтому ток, на который должен быть рассчитан выпрямитель источника питания, может быть определен из выражения

$$i(t) = i_{np}(t) - i_{обн}(t) = \frac{U_0}{R_n} + \frac{2U_0}{\sqrt{4 \cdot Z_с^2 - R_0^2}} \cdot e^{-\frac{R_0}{2 \cdot L_0} t} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{4 \cdot Z_с^2 - R_0^2}}{2L_0} t \right). \quad (6)$$

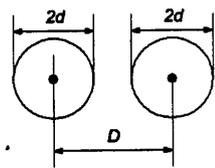
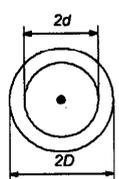
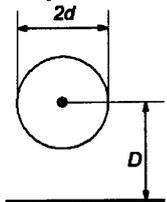
Из выражений (4) и (5) следует, что амплитуда тока обратной волны достигает максимума в линиях без потерь и равна напряжению в точке возникновения КЗ на линии, деленному на волновое сопротивление линии

$$i_{об\max} = U_0 / Z_с. \quad (7)$$

Гармоническая составляющая возникающих колебаний (4,5) при принятых допущениях определяется параметрами линии, наложенными на экспоненциальную составляющую затухания вызванного переходного процесса при условии, что линия имеет потери. Чем выше потери и меньше погонная индуктивность, тем быстрее затухают колебания.

Соединение источника электропитания с электронно-лучевой установкой обычно осуществляется одним из трех вариантов: коаксиальным кабелем; двухпроводной линией (как воздушной, так и помещенной в металлический короб, присоединенный к нулевому потенциалу) или отдельным проводом в высоковольтной изоляции, расположенным на некоторой высоте над проводящей металлической конструкцией, потенциал которой равен потенциалу земли.

Для нахождения амплитуды обратной волны, как следует из (7), необходимо знать напряжение на линии и ее волновое сопротивление. Для нахождения волнового сопротивления, которое в основном зависит от поперечных размеров линии и вида применяемого диэлектрика между проводниками линии, определим погонные емкости и индуктивности для указанных выше подключений. Для простоты считаем, что все эти линии помещены в вакуум. Запишем приближенные значения погонных емкостей и индуктивностей для этих соединений, воспользовавшись справочной литературой [1–3,7]. В случае двухпроводной линии влиянием земли можно пренебречь, если высота подвеса над землей значительно больше расстояния между проводниками (таблица).

Схема линии соединения	Условия	C_0	L_0	$Z_с$
<p>1 Двухпроводная линия</p> 	$D \gg d$	$\frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}$	$\frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D}{d}$	$z_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{D}{d} \approx 120 \left(\ln \frac{D}{d} \right). \quad (8)$
<p>2 Коаксиальная линия</p> 		$\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}$	$\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \frac{D}{d}$	$z_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{D}{d} \approx 60 \cdot \ln \frac{D}{d}. \quad (9)$
<p>3 Однопроводная линия</p> 	$\frac{2 \cdot D}{d} \gg 3$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{2 \cdot D}{d}}$	$\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \frac{2 \cdot D}{d}$	$z_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2 \cdot D}{d} \approx 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot D}{d}. \quad (10)$

Здесь $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{Н}}{\text{М}}$ – электрическая и магнитная постоянные, соответственно.

Рассмотрение однопроводной линии сводится к рассмотрению двухпроводной линии с расстоянием между проводами равным $2D$. Емкость между проводом и землей однопроводной линии равна двойной емкости между проводом и его зеркальным отображением. Согласно [7], индуктивность однопроводной линии, обратным проводом которой служит земля, вдвое меньше индуктивности соответствующей двухпроводной линии, обратный провод которой находится от прямого на расстоянии $2D$.

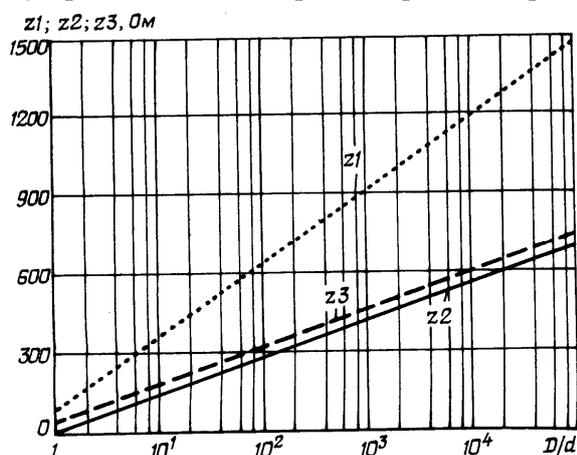


Рис. 3

Ом. В тоже время, при соединении двухпроводной линией с радиусом провода в 3 мм и расстоянием между проводами в 24 см волновое сопротивление может достигать 600 Ом. Следовательно, достоинством воздушных линий является возможность изменять в широком диапазоне величину волнового сопротивления. Здесь мы не рассматриваем радиочастотные кабели типа РС со спиральными проводниками.

Сравним переходные процессы при соединении источника с ЭЛП кабелем типа ЗКВЭЛ-60 с распределенными параметрами $R_{0к} = 0.015 \frac{\text{Ом}}{\text{М}}$, $L_{0к} = 0.42 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{М}}$, $C_{0к} = 150 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$ и с помощью двухпроводной линии, подвешенной на тарельчатых изоляторах, с распределенными параметрами $R_{0л} = 0.015 \frac{\text{Ом}}{\text{М}}$, $L_{0л} = 1.2 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{М}}$, $C_{0л} = 14 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$. Для определенности считаем, что линия соединения источника питания с ЭЛП имеет длину 10 м, напряжение на линии $U=30$ кВ. Используем выражение (4), пренебрегая гармонической составляющей.

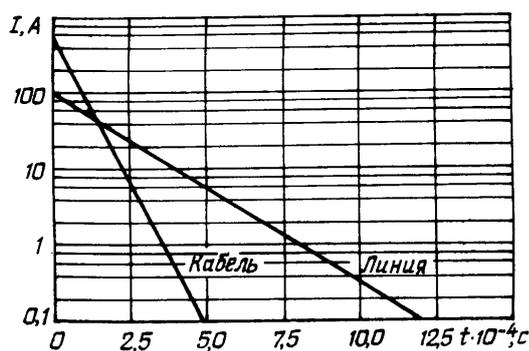


Рис. 4

Из анализа кривых рис. 4 следует, что при использовании кабеля, амплитуда обратной волны тока максимальна при минимальной длительности переходного процесса. Рассмотрим пример. Пусть источник высокого напряжения состоит из высокочастотного инвертора, повышающего трансформатора и высоковольтного выпрямителя. Выпрямитель выполнен по мостовой схеме без использования фильтрующих емкостей и содержит в каждом плече по 45 диодов с обратным напряжением в 1 кВ и прямым падением 1,5 В. При глухом коротком замыкании в нагрузке вся энергия, запасенная в линии соединения, выделится на выпрямительных диодах. Для соединения, выполненного кабелем, это составит около 20 кВт за 0,5 мсек, а для двухпроводной линии – чуть более 8 кВт за 1,2 мсек. Мгновенная мощность, рассеиваемая каждым диодом, составит при соединении кабелем 900 Вт, при соединении двухпроводной линией – 150 Вт. Следовательно, при соединении кабелем с параметрами, указанными выше, нельзя обеспечить безаварийную работу выпрямителя без принятия дополнительных мер. При подключении источника к нагрузке с помощью двухпроводной линии возможна безаварийная работа выпрямителя, если использовать большее расстояние между

Зная погонные индуктивности и емкости для рассматриваемых видов подключения, определим волновые сопротивления. Полученные значения Z_0 с учетом принятых допущений сведем в таблицу.

Сравним волновые сопротивления для разных вариантов соединения. На рис. 3 по выражениям (8)–(10) построены зависимости волнового сопротивления от отношения D/d , где d – радиус провода или внутренней жилы кабеля, а D – наружный радиус кабеля, или расстояние между проводами, или высота подвеса провода.

Как видно, кабельное соединение, с отношением $D/d=10-20$, может иметь волновое сопротивление до 100–150 Ом. Однопроводная линия с радиусом провода 1,5–3 мм и высотой подвеса 3 м, может иметь волновое сопротивление до 400–500

Ом. В тоже время, при соединении двухпроводной линией с радиусом провода в 3 мм и расстоянием между проводами в 24 см волновое сопротивление может достигать 600 Ом. Следовательно, достоинством воздушных линий является возможность изменять в широком диапазоне величину волнового сопротивления. Здесь мы не рассматриваем радиочастотные кабели типа РС со спиральными проводниками.

проводами для увеличения волнового сопротивления и выбирать диоды, которые способны пропустить обратную волну тока.

Моделирование переходных процессов в электрической схеме, показанной на рис. 1, проводилось с помощью программы PSpice, входящей в пакет OrCAD. Линия, соединяющая источник питания с ЭЛП, была представлена в виде схемы замещения, состоящей из нескольких Г-образных звеньев. Необходимое для получения достоверных результатов при моделировании количество звеньев N определим из полосы пропускания схемы замещения. Запишем, пренебрегая проводимостью, напряжение на выходе одного из звеньев схемы замещения

$$U_2 = U_1 \frac{1}{p \cdot C_0 \cdot l} \left(p \cdot L_0 \cdot l + R_0 \cdot l + \frac{1}{p \cdot C_0 \cdot l} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Тогда передаточную функцию звена можно представить в виде

$$W_1(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{p^2 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot l^2 + p \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot l^2 + 1} = \frac{1}{p^2 \cdot T^2 + 2 \cdot k \cdot T + 1}, \quad (12)$$

где $T = l \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}$, $k = \frac{R_0 \cdot l}{2 \cdot Z_0}$.

Так как схема замещения представлена последовательным соединением N однотипных Г-образных звеньев, то общая передаточная функция схемы замещения будет иметь вид

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_N(p) = \left(\frac{1}{p^2 \cdot T(N)^2 + 2 \cdot k(N) \cdot T(N) + 1} \right)^N, \quad (13)$$

где постоянная времени звена $T(N) = \frac{l}{N} \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}$, (14)

а коэффициент затухания звена $k(N) = \frac{R_0 \cdot l}{2 \cdot N \cdot Z_0}$.

Определим необходимое количество звеньев, которое нужно учесть в эквивалентной схеме замещения линии для того, чтобы исследовать процессы в линии соединения в полосе частот f . Из (14)

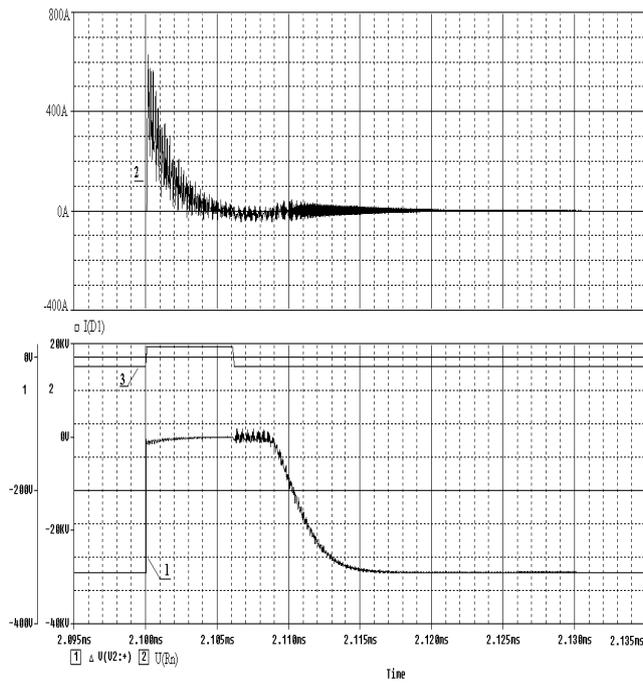
получаем $2 \cdot \pi \cdot f = \frac{1}{T(N)}$, откуда $N = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}$. (15)

Из (15) следует, для того, чтобы исследовать переходной процесс в рассматриваемых примерах, в полосе частот втрое превышающей частоту собственных колебаний линий соединения, достаточно учитывать в схеме замещения (рис. 1) четыре звена.

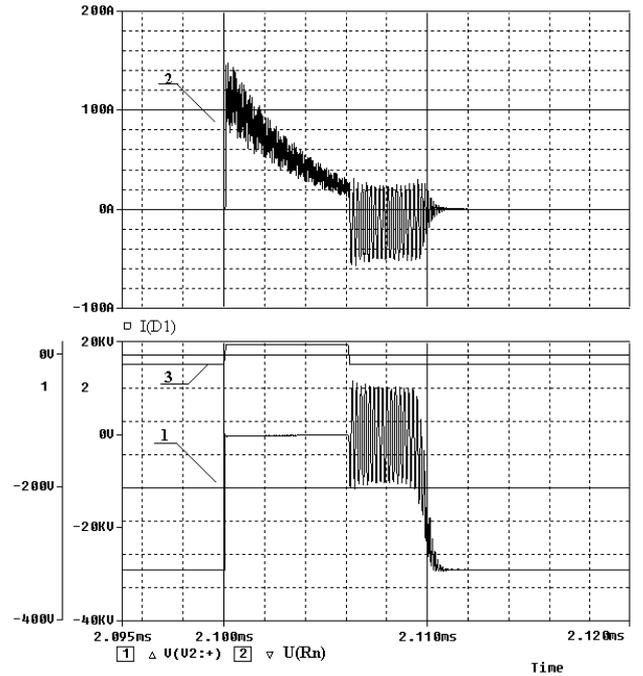
Результаты моделирования переходных процессов при коротком замыкании в нагрузке показаны на рис. 5, где: кривая 1 – напряжение на выходе линии соединения, т.е. напряжение на нагрузке; 2 – ток через диод, т.е. обратная волна тока через выпрямительные диоды источника питания; 3 – время, в течение которого ключ SA1 замкнут (рис. 1). На рис. 5, а – результаты моделирования при соединении источника с нагрузкой с помощью кабеля, причем нагрузка соответствует вольтамперной характеристике ЭЛП (2); на рис. 5, б – при соединении источника с нагрузкой двухпроводной линией с нагрузкой вида (2); на рис. 5, в – при соединении источника с нагрузкой двухпроводной линией, причем нагрузка представлена постоянным резистором, величина которого соответствует току в номинальном режиме; на рис. 5, г – результаты моделирования, аналогичные представленным на рис. 5, б, но с дополнительной индуктивностью (100 мкГн), включенной последовательно с источником высокого напряжения.

Из анализа кривых рис. 5 следует, что

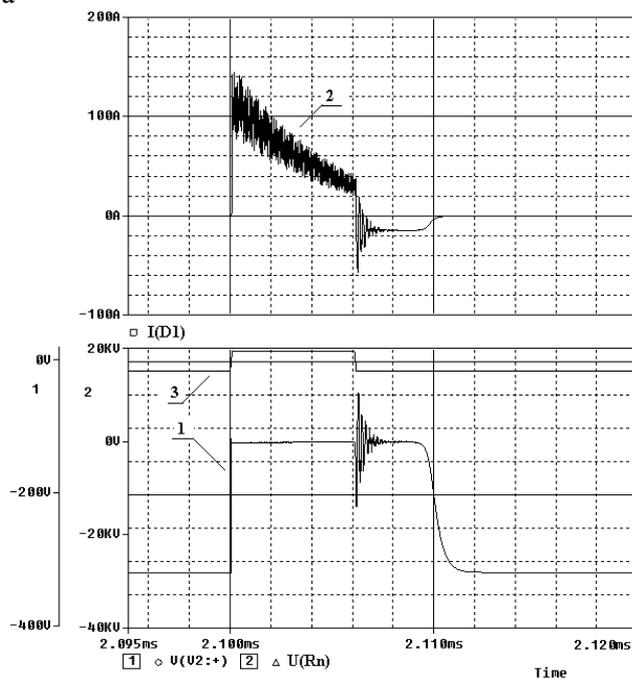
– во время пробоя, скачкообразно снижается напряжение на нагрузке и в линии с потерями, соединяющей источник питания с нагрузкой, возникает затухающий переходной процесс, амплитуда и частота которого определяются выражением (4).



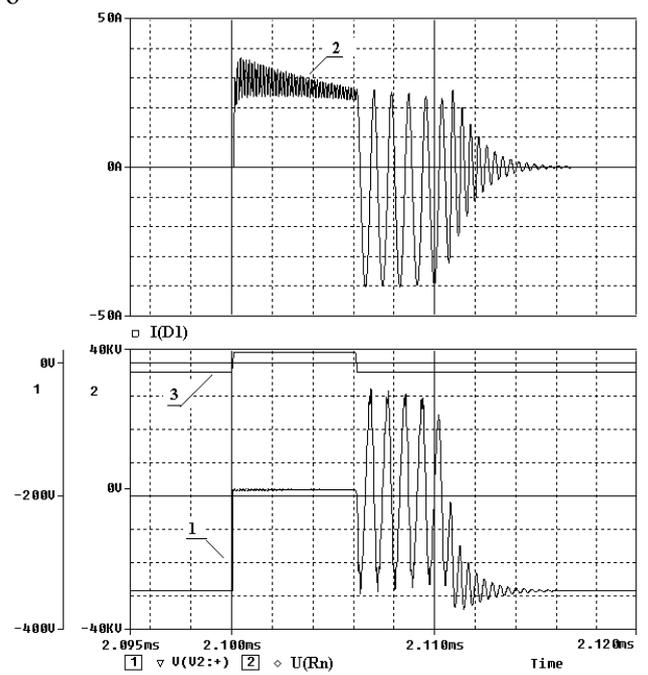
а



б



в



г

Рис. 5

– Во время пробоя, амплитуда тока через выпрямительные диоды, увеличивается на величину, равную амплитуде обратной волны тока линии. Амплитуда тока максимальна при соединении кабелем (рис. 5, а).

– Самое быстрое затухание переходного процесса наблюдается при соединении кабелем, так как L_0 кабельной линии меньше, чем при других соединениях.

– Если за время пробоя вся энергия линии соединения рассеялась, то восстановление высокого напряжения на нагрузке происходит без существенного колебательного процесса (рис. 5, а).

– Если нагрузка представлена в виде постоянного резистора и за время пробоя вся энергия линии соединения полностью не рассеялась, восстановление высокого напряжения происходит без существенного колебательного процесса (рис. 5, в).

– При учете ВАХ нагрузки вида (2), если энергия, запасенная в линии за время пробоя, полностью не рассеялась, то во время восстановления диодов возникают существенные колебания, причем амплитуда колебаний напряжения может достигать нескольких десятков кВ.

– Если энергия в линии полностью не рассеялась за время пробоя, то подъем выходного напряжения после окончания пробоя происходит существенно быстрее.

Наиболее простым средством ограничения обратной волны тока при пробоях является введение высоковольтного дросселя (защунтированного обратным диодом или просто резистором) между выходом высоковольтного выпрямителя и ЭЛП. Это средство защиты может быть эффективно и при кратковременных самовосстанавливающихся пробоях, когда электрический разряд неустойчив и время его деионизации не превышает нескольких микросекунд. При этом в зависимости от величины индуктивности дросселя могут возникнуть проблемы с поиском эффективной конструкции самого дросселя, так как при пробое к нему прикладывается все напряжение источника питания. Величина индуктивности высоковольтного дросселя напрямую зависит от емкости, приведенной к выходным клеммам источника питания, и допустимой величины обратной волны тока, которую могут пропустить выпрямительные диоды источника питания. Высоковольтный дроссель и емкость, приведенную к выходным клеммам источника, можно рассматривать как некий отрезок линии, к которому применимы полученные ранее выражения (4,5,7).

Исходя из необходимого уровня ограничения обратной волны тока через выпрямительные диоды, выбираем величину волнового сопротивления, которую необходимо реализовать, используя высоковольтный дроссель и емкость, приведенную к выходным клеммам источника.

На рис. 6 показаны расчетные значения индуктивности высоковольтного дросселя в зависимости от емкости, приведенной к выходным клеммам источника питания, и волнового сопротивления.

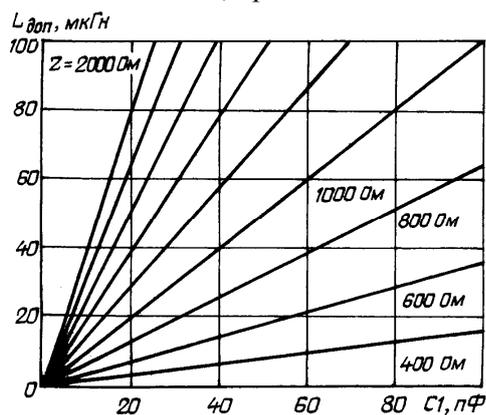


Рис. 6

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Наихудший случай для источника питания возникает при искрении и пробоях, при которых запасенная энергия в линии полностью не рассеивается за время существования пробоя. При анализе переходных процессов в системе источник питания–линия соединения–нагрузка необходимо учитывать ВАХ нагрузки и реальные параметры диодов. Введение индуктивности последовательно с выходом высоковольтного источника питания существенно ограничивает амплитуду обратной волны тока и может служить инструментом защиты высоковольтного источника питания от пробоев при минимизации емкости, приведенной к выходным клеммам источника питания.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
2. Иосель Ю.Я. и др. Расчет электрической емкости.-2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981. – 288 с.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
4. Мартынов В.В. Источники электропитания для электронно-лучевого и плазменного технологического оборудования // Пр. Ин-ту электродинамики НАН України. – 2004. – №3(9). – С. 43–49.
5. Матвеев Н.В. Высоковольтные системы электропитания для микроволновых и электронно-лучевых технологических установок // IX Симпозиум "Электротехника 2030", доклад 07.07. 2007.
6. Спивак В.М. и др. Системы управления лучевых технологических установок. – К.:Техника, 1988. – 272 с.
7. Теоретические основы электротехники, ч.3. / Под ред. Поливанова К.М. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
8. Ткачев Л.Г., Батов Н.Г. и др. Волновые процессы в технологических установках с электронно-лучевым нагревом // Электротехника. – 1995. – №9. – С. 39–41.
9. Чернов В.А. Мощные электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) и оборудование на их основе // IX Симпозиум "Электротехника 2030", доклад 07.10. 2007.

Надійшла 07.07.2009