



ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЯХ ПОСЛЕ РАЗРЯДОВ В СВАРОЧНОЙ ПУШКЕ

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**, **В. А. МАТВЕЙЧУК**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С использованием компьютерного моделирования рассмотрено возникновение перенапряжений в выходных цепях высоковольтного источника питания, кабеле и сварочной пушке после разряда в ней. Рекомендуются оптимальные параметры элементов цепи ограничения перенапряжений для мощных источников питания.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронная пушка, источник ускоряющего напряжения, ограничительный резистор, собственная индуктивность, шунтирующий диод, высоковольтный кабель, разряд в пушке, моделирование переходных процессов

Развитие в сварочной пушке аномальных нестационарных процессов, к которым относятся электрические разряды из-за нарушения вакуумной изоляции, может привести не только к нарушению формирования шва, но и вызвать повреждение ряда узлов энергетического блока — высоковольтных изолятора сварочной пушки и кабеля (рис. 1), а также ограничительного резистора. Поскольку указанные узлы выдерживают без разрушения испытательное напряжение, вдвое превышающее рабочее, то можно предполагать существование перенапряжений, по крайней мере, вдвое превышающих рабочее.

В сварочной пушке перенапряжения после разряда были выявлены еще в начале применения электронно-лучевой сварки, но проведение приборных измерений быстро протекающих процессов под высоким потенциалом относительно земли крайне затруднено [1–4]. Это частично объясняет отсутствие публикаций по проблеме предотвращения перенапряжений после разряда в сварочной пушке. Экспериментально удается фиксировать лишь токовые перегрузки источников ускоряющего напряжения.

Использование проходной электронной лампы в качестве линейного элемента предотвращает значительные броски тока в источнике питания после разряда в сварочной пушке. Однако зафиксировано, что, например, в аппаратуре с ускоряющим напряжением 60 кВ после разряда в пушке напряжение на проходной лампе может возрасти до 130 кВ, что может вызвать практически одновременно разряд в проходной лампе. Для этого аварийного случая источник ускоряющего напряжения должен быть снабжен, кроме

максимальной, дополнительной системой защиты. Часто для этого используют ограничительные резисторы, включенные последовательно с нагрузкой. Значение сопротивления резистора ограничивается мощностью, рассеиваемой на нем, и смягчением нагрузочной характеристики источника. Поэтому, например в работе [2], предлагается последовательно с выходом высоковольтного источника питания в качестве инструмента его динамической защиты использовать высоковольтный дроссель, шунтированный обратным диодом или просто резистором. При этом перенапряжения

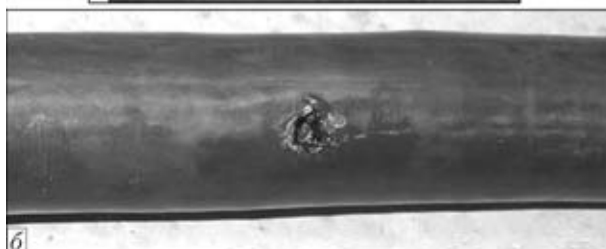


Рис. 1. Высоковольтный изолятор из высокоглиноземистой керамики (а) и высоковольтный кабель (б), выдержавшие испытательное напряжение 120 кВ, но разрушенные в процессе эксплуатации стандартного энергоблока ЭЛА-60 (номинальное напряжение 60 кВ)

в системе источник–высоковольтный кабель–изолятор не рассматривались.

Конструктивно ограничительные резисторы могут быть объемными и проволочными. Последние отличаются заметной собственной индуктивностью, которая уменьшает скорость нарастания тока источника во время разряда, но вызывает колебательный процесс в высоковольтном кабеле и самом резисторе. Ранее оптимальное соотношение сопротивления и собственной индуктивности также не обсуждалось. Поэтому данная работа посвящена моделированию нестационарных и аварийных ситуаций в системе источник ускоряющего напряжения–высоковольтный кабель–сварочная пушка для выбора оптимальных параметров защиты от перенапряжений.

Объект и методика исследования. Для стандартного энергоблока ЭЛА-60 (рис. 2) при моделировании переходных процессов [5] после разряда в сварочной пушке можно сделать несколько упрощающих допущений. Из схемы для моделирования (рис. 3) исключены сама пушка X1 и высоковольтный кабель, который представлен электрическим звеном с сосредоточенными емкостью, индуктивностью и сопротивлением. Некоторая погрешность такого представления влияет только на высокочастотные составляющие переходного процесса. Поскольку установлено, что ток нагрузки не влияет на характеристики возникающих при разряде в пушке переходных процессов, он задан произвольно (300 мА). Источник ускоряющего напряжения представлен источником напряжения V1 с диодом D1 (конденсаторы C3 и C4 учитывают все емкости относительно земли, приведенные к отрицательной и положительной клеммам источника). Последовательно с источником ускоряющего напряжения V1 в его плюсовой цепи включен резистор R4 = 60 кОм, симулирующий проходную электронную лампу X2 в режиме протекания тока 300 мА. Разряды в сварочной пушке и в лампе симулируются соответственно ключами S1 и S2, которые управляются источниками импульсного напряжения V2 и V3. Сопротивление контактов имитатора пробоя S1 в разомкнутом состоянии составляет 200 кОм, что соответствует протеканию стационарного тока 300 мА, сопротивление замкнутого контакта S1 при имитации разряда — 0,01 Ом, а сопротивление контактов ключа S2 в разомкнутом состоянии — 100 МОм, в замкнутом — 0,01 Ом. Длительность короткого замыкания задается заданым большим временем (5 мкс), что соответствует двум стадиям разряда — пробоем и искре [6]. В качестве защиты используют ограничитель-

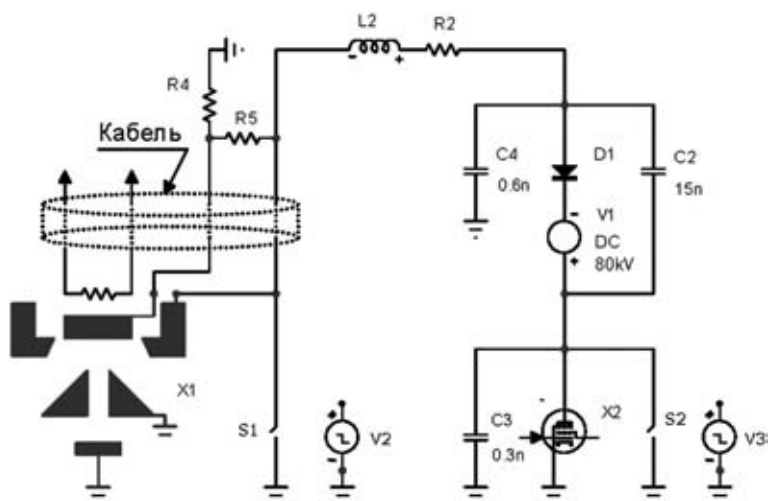


Рис. 2. Упрощенная блок-схема стандартного энергоблока ЭЛА-60 с элементами для моделирования переходных процессов (здесь и на рис. 3 пояснения даны в тексте)

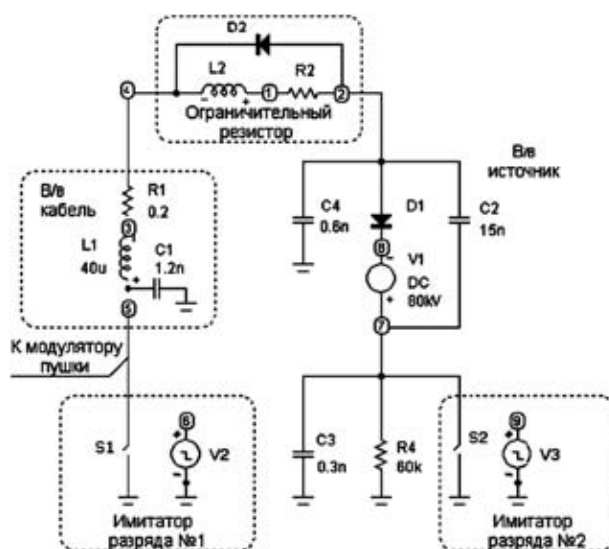


Рис. 3. Схема для моделирования переходных процессов

ный резистор R2 с собственной индуктивностью L2. Высоковольтный кабель имеет длину 10 м.

Результаты и их обсуждение. Временные диаграммы переходных процессов представлены на рис. 4, где даны следующие обозначения: $v(C1)$ — потенциал в узле подсоединения кабеля к модулятору пушки; $v(4,2)$ — падение напряжения на ограничительном резисторе; $I(7,8)$ — ток источника ускоряющего напряжения; $v(V2)$, $v(V3)$ — задание времени существования разряда.

Как следует из временной диаграммы, приведенной на рис. 4, а, во время разряда только в пушке потенциал модулятора падает до нуля, а после прекращения разряда номинальное значение ускоряющего напряжения восстанавливается аperiodически без опасных перенапряжений. Амплитуда колебаний напряжения на ограничивающем резисторе изменяется в диапазоне $\pm U_{\text{уск}}$, а амплитуда тока, протекающего через источник питания, не превышает 12 А. Такое развитие со-



бытий вполне приемлемо и не является аварийной ситуацией.

Однако последовательный разряд в пушке и проходной лампе (рис. 4, б) уже создает аварийную ситуацию: потенциал модулятора достигает -150 кВ, амплитуда колебаний напряжения на ограничивающем резисторе — ± 240 кВ, ток источника питания за время существования разряда успевает вырасти до 125 А.

Поэтому во избежание данной аварийной ситуации необходимо увеличить сопротивление ограничительного резистора до значения, приемлемого в отношении смягчения нагрузочной характеристики источника питания, рассеяния выделяемого в масляном баке тепла и потерь полезной мощности. Естественно, для каждого конкретного

источника это значение может изменяться. Например, для источников с током нагрузки около 1 А оптимальным сопротивлением является $1000 \dots 1200$ Ом. Как следует из полученных временных диаграмм переходных процессов при одновременных разрядах в сварочной пушке и проходной лампе при использовании $R_{\text{огр}} = 1200$ Ом, имеющего собственную индуктивность $L = 6$ мГн (рис. 4, в), после прекращения разряда перенапряжение в точке соединения кабеля с модулятором пушки снизилось до -75 кВ, а амплитуда тока, протекающего через источник питания, не превышала 30 А. Однако колебания потенциала в цепи ограничительного резистора остаются достаточно значительными (от 90 до -120 кВ).

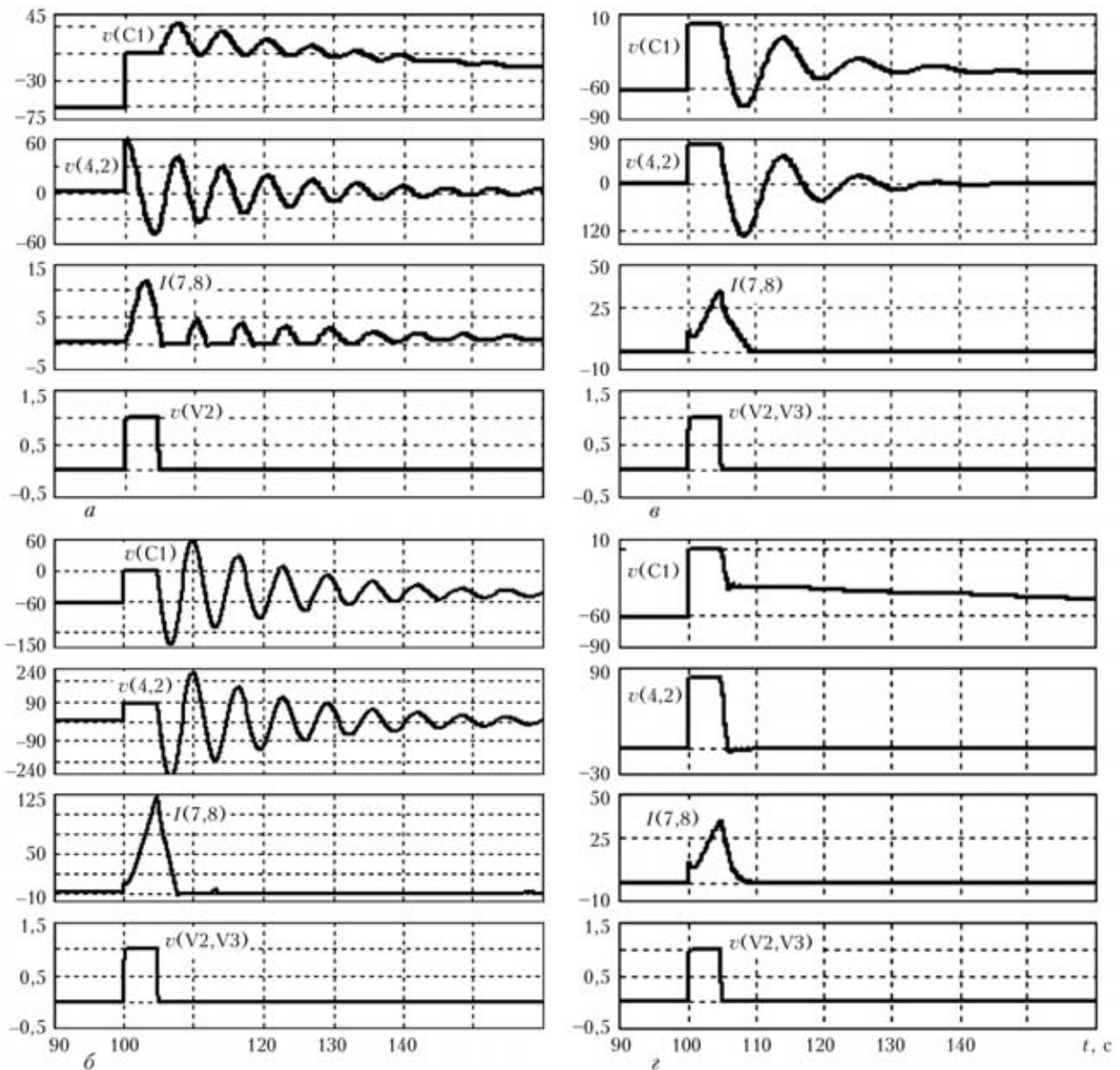


Рис. 4. Временные диаграммы переходных процессов: а — разряд только в пушке, $R_{\text{огр}} = 200$ Ом, $L = 2$ мГн; б — последовательный разряд в пушке и проходной лампе, $R_{\text{огр}} = 200$ Ом, $L = 2$ мГн; в — последовательный разряд в пушке и проходной лампе, $R_{\text{огр}} = 1200$ Ом, $L = 6$ мГн; г — последовательный разряд в пушке и проходной лампе, $R_{\text{огр}} = 1200$ Ом, $L = 6$ мГн, включен шунтирующий диод

Следующий шаг в борьбе с перенапряжениями — шунтирование ограничительного резистора диодом (фактически — цепочкой последовательно соединенных диодов, выдерживающих падение напряжения до $1,5U_{\text{уск}}$), как и следовало ожидать, приводит к полному подавлению колебательного процесса. Благодаря этому отсутствует перенапряжение в кабеле, падение напряжения на ограничительном резисторе составляет только 80 кВ (рис. 4, з).

Хотя численные значения, полученные при моделировании переходных процессов, не могут быть полностью достоверными, тем не менее общие закономерности влияния параметров защиты на характер этих переходных процессов представляются убедительными. Подтверждением эффективности повышения сопротивления ограничительного резистора и шунтирования его цепочкой обратных диодов является то, что после применения этих рекомендаций пробой главной изоляции высоковольтных кабелей, разрушения ограничительного резистора и высоковольтных изоляторов сварочных пушек в нашей практике не происходили.

Аналогичная защита также обеспечивает безаварийную работу мощных энергоблоков инверторного типа с высокочастотным преобразованием частоты питающей сети, в которых проходная лампа не используется. В энергоблоках меньшей мощности значение ограничительного резистора может быть соответственно увеличено, что еще больше повышает эффективность системы защиты от перенапряжений и снижает ток источника при разряде в пушке.

Выводы

1. Система ограничения перенапряжений и проходная лампа стандартного энергоблока ЭЛА-60 обеспечивают безопасный уровень перенапряжений в системе источник питания—кабель—пушка после разряда в сварочной пушке.

2. Последовательный разряд в пушке и в проходной лампе уже создает аварийную ситуацию

— потенциал модулятора в 2,5 раза, а ограничительного резистора в 4 раза превышает уровень ускоряющего напряжения, что может привести к повреждению изолятора, кабеля и ограничивающего резистора.

3. Максимально приемлемое увеличение сопротивления ограничивающего резистора в 6 раз (от 200 до 1200 Ом) не предотвращает колебательный процесс при последовательном разряде в пушке и лампе, но амплитуда колебаний в кабеле превышает ускоряющее напряжение только на 20 %. Однако амплитуда максимального перенапряжения на ограничительном резисторе вдвое превышает ускоряющее напряжение.

4. Шунтирование ограничительного резистора цепочкой обратных диодов исключает возбуждение колебательного процесса при последовательном разряде в пушке и лампе. Благодаря этому полностью отсутствует перенапряжение в кабеле, падение напряжения на ограничительном резисторе превышает ускоряющее напряжение только на 50 %.

5. Полученные результаты приемлемы для использования как в источниках без частотного преобразования, так и в инверторных источниках.

1. Назаренко О. К., Ланбин В. С. Исследование высоковольтных цепей управления током сварочного электронного пучка // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 26–30.
2. Шидловская Н. А., Мартынов В. В. Согласование высоковольтного источника питания с электронно-лучевой установкой // Техн. электродинамика. — 2010. — № 1. — С. 73–79.
3. Волновые процессы в технологических установках с электронно-лучевым нагревом / Л. Г. Ткачев, Н. Г. Батов, А. Ф. Лебедев, В. Ф. Шинкарев // Электротехника. — 1995. — № 9. — С. 39–41.
4. Щербаков А. В., Беневольский Е. С. Коммутационные процессы в источниках питания сварочных электронных пушек при возникновении высоковольтных пробоев // Свароч. пр-во. — 2010. — № 10. — С. 18–23.
5. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap8. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 466 с.
6. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004. — 706 с.

Formation of overvoltage in output circuits of a high-voltage power supply, cable and welding gun after a discharge taking place in it was studied by using computer modelling. Recommendations are given on optimal parameters of elements of the overvoltage limitation circuit for the high-voltage power supplies.

Поступила в редакцию 19.06.2011