

О МОДЕЛИРОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА

В. И. Кашиинцов

(Москва)

Интерес к вопросам моделирования и расчета электрического взрыва проводников вызван применением его наряду с другими отключающими устройствами [1, 2] для быстрого разрыва цепи индуктивного накопителя. В настоящее время наметились два пути расчета параметров проводников и контура применительно к установкам с повышенной энергоемкостью — численный метод и метод подобия. Численные методы [3, 4] основаны на решении уравнений контура с использованием опытных зависимостей проводимости взрывающихся проводников от введенной энергии, но, как показано в [5], проводимость не является однозначной функцией выделенной энергии, так как зависит от скорости подвода тепла, площади поверхности проводников, диэлектрических особенностей внешней среды и т. д., поэтому точность этих расчетов оказывается невысокой ($\leq 200\%$). Критерии подобия [6, 7] облегчают экспериментальное исследование процесса взрыва и его физическое понимание, но не решают вопроса моделирования. В частности, они не могут предсказать такую важную характеристику, как амплитуда напряжения при взрыве проводников.

В настоящей работе рассмотрено моделирование электрических характеристик контура, сопутствующих взрыву проводника, применительно к его использованию для целей коммутации индуктивного накопителя.

Предпосылки моделирования

Процесс взрыва проводника состоит из двух стадий — нагрева и разрушения [7]. Поскольку вторая стадия в отличие от первой характеризуется интенсивным отводом тепла за счет процесса испарения, то в общем случае характер взрыва определяется не только запасом энергии в источнике, но и скоростью ее подвода. На интенсивность отвода тепла в значительной степени влияют внешние и конструктивные факторы. Замечено, что повышение плотности окружающей среды затягивает процесс разрушения [8], а увеличение площади поверхности (при одинаковых начальных условиях) создает предпосылки более быстрого разрушения [9]. Ввиду того, что внешние и конструктивные особенности проведения опыта всегда можно сохранить при изменении масштаба, то, по-видимому, сохранив режим подвода энергии в течение процесса взрыва, можно добиться сохранения и его наиболее важных для приложений характеристик, таких как, например, амплитуда возникающего напряжения, характер волн сжатия [10] и др.

Рассмотрим особенности ввода и ограничения тепловой энергии в проводник, взрываемый в контуре, содержащем источник тока и индуктивность. Условие создания заданного теплового режима в течение первой стадии и его ограничение на момент начала разрушения могут быть заданы в виде

$$j_* = a \quad \text{при} \quad dj/dt = b, \quad (1)$$

где j_* — плотность тока в конце стадии; b — средняя скорость нарастания плотности тока; a — постоянная, зависящая от материала проводника и значения b . Это условие определяется выражениями для потока тепла в проводник $dQ/dt = \rho(t)j^2(t)$, где Q — тепловая энергия, ρ —

удельное сопротивление, и выражением интеграла «действия» $h(t) = \int_0^t j^2 dt$, так как на момент начала разрушения $h(t) = h_*$ является постоянной, зависящей от материала проводника [6].

В начале второй стадии поток тепловой энергии задается значением i_* . Однако в процессе ее развития энергия к проводнику может поступать как от исходного источника, так и из индуктивности. Момент перехода от одного энергетического элемента к другому определяется соотношением сопротивлений R_* проводника к началу второй стадии и внутреннего сопротивления Z источника. При $R_* < Z$ энергия поступает из основного источника, а при $R_* > Z$ основная часть энергии потребляется из индуктивности. Однако момент переключения энергоемких элементов может быть зафиксирован в известной форме согласования

$$R_0 = 1/\delta \cdot Z, \quad (2)$$

где R_0 — начальное сопротивление проводника; коэффициент $\delta > 1$ в силу того, что отношение R_*/R_0 постоянно для большинства исследованных металлов [11] и зависит в основном от скорости подвода тепла.

При $\delta \simeq 10 \div 12$ момент t_* начала разрушения совпадает с моментом максимума тока в проводнике. Сохранение значения δ при изменении масштаба обязательно, так как оно влияет на время поглощения энергии из контура. Характеристики внешней среды и конструктивные особенности оказывают влияние на процесс ввода энергии, как отмечалось выше, через механизм регулирования скорости нарастания сопротивления.

Процесс нарастания потока тепла в проводник во второй стадии, связанный частично с увеличением удельного сопротивления, а также с изменением плотности тока, носит ограниченный характер. Максимальное значение этого потока зависит от совокупности начальных и внешних условий и совпадает, как показали многочисленные экспериментальные данные (см., например, [12]), с максимальной напряженностью поля E_* вдоль взрывающегося проводника. При соблюдении начальных внешних и конструктивных условий значение E_* сохраняется с точностью до 5% [13]. Величина

$$E_* = U/l, \quad (3)$$

где E_* — амплитудное значение напряжения на проводнике; l — длина проводника, может быть использована как условие ограничения потока энергии в проводник.

Условия (1)–(3) сохранения заданного потока энергии в проводнике в течение процесса легко могут быть выполнены при изменении масштаба опыта с использованием однотипного источника (например, в LRC -контуре).

Моделирование взрыва проводника в LRC -контуре

Для случая взрыва проводника в LRC -контуре условия (1)–(3) могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} hV/SZ &= a, \\ V/SL|_{t=0} &= b, \\ R_k + \rho_0 l/S &= 1/\delta \cdot Z, \\ U &= E_* l, \end{aligned} \quad (4)$$

где V — начальное напряжение на емкости C ; L — индуктивность; ρ_0 — начальное удельное сопротивление проводника; S — исходное сечение;

R_k — активное сопротивление разрядного контура, за исключением сопротивления проводника; $Z = (L/C)^{1/2}$. (Величиной R_k можно пренебречь, когда $R_k \ll \rho_0 l/S = R_0$.) Коэффициент $\eta = I_*/I < 1$, где I_* — амплитуда тока на момент начала второй стадии; I — амплитуда тока в контуре с идеальными условиями ($R_k + R_0 = 0$) на момент времени $t = \pi/2 \cdot (LC)^{1/2}$. Во втором уравнении скорость нарастания плотности тока для удобства взята в начальный момент времени, однако может быть использовано и некоторое среднее значение.

Легко видеть, что решение системы (4) с измеренными в предварительном опыте постоянными a, b, δ, η, E_* отвечает на два главных вопроса моделирования: а) как видоизменить параметры взрывающегося проводника и LRC -контура, чтобы, сохранив амплитуду отключаемого тока, увеличить амплитудное значение напряжения U , возникающего на проводнике, в n раз и б) как видоизменить параметры взрыва проводника и LRC -контура, чтобы, оставив неизменным амплитуду возникающего напряжения U , увеличить отключаемый ток в n_1 раз.

Решению системы (4), с учетом равенства $I_* = Sa$, где I_* — амплитуда тока на момент начала второй стадии в искомом сечении S проводника, удовлетворяют параметры LRC -контура и размеры проводника в первом случае: $S = S_0, l = nl_0, C = 1/n \cdot C_0, V = nV_0, L = nL_0$; во втором случае: $S = n_1 S_0, l = l_0, C = n_1 C_0, V = V_0, L = 1/n_1 \cdot L_0$, где S_0, l_0, C_0, L_0, V_0 — известные характеристики, а S, l, C, L, V — искомые величины; n и n_1 — масштаб моделирования. Отметим наиболее важные свойства LRC -контура, которые сохраняются при любом значении n и n_1 :

- 1) период собственных колебаний $T_0 = 2\pi(L_0 C_0)^{1/2} = T_1 = 2\pi(LC)^{1/2}$;
- 2) магнитный поток Φ для любого n возрастает пропорционально n , а для любого n_1 остается постоянным;
- 3) накопленная энергия в емкости C и объем взрыва проводника изменяются пропорционально масштабу моделирования n и n_1 .

Эксперимент

Исходными данными в опытах служил взрыв медного проводника с $S_0 = 7,8 \cdot 10^{-5}$ см² и $l = 35$ см в LRC -контуре с параметрами $C_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, $L_0 = 25 \cdot 10^{-6}$ Г, $V_0 = 30$ кВ. По данным опыта определены постоянные: $a = 3,1 \cdot 10^7$ А/см², $b = 1,6 \cdot 10^{13}$ А/(см² · с), $\delta = 11$, $\eta = 0,65$, $E_* = 10$ кВ/см. Для проверки проведены две серии опытов. В первой проверялось моделирование амплитуды напряжения при постоянной амплитуде отключаемого тока, во второй — моделирование амплитуды тока. Масштаб моделирования ограничивался имеющимися возможностями и изменялся в пределах $n = n_1 = 1 \div 8$ раз. Результаты опытов и контролируемые параметры приведены в таблице.

n, n_1	$I_*, \text{кА}$	$U, \text{кВ}$	$C, \text{мкФ}$	$L, \text{Г}$	$V, \text{кВ}$	$\Phi, \text{Вб}$	$l, \text{см}$	$S, \text{см}^2$
1	2,6	44	4	$3,1 \cdot 10^{-6}$	3,25	$8,2 \cdot 10^{-3}$	4,6	$7,8 \cdot 10^{-5}$
	2,6	350	0,5	$25 \cdot 10^{-6}$	30	$6,5 \cdot 10^{-2}$	35	$7,8 \cdot 10^{-5}$
2	2,6	87	2	$6,25 \cdot 10^{-6}$	7,5	$1,64 \cdot 10^{-2}$	8,5	$7,8 \cdot 10^{-5}$
	5,1	345	1	$12,5 \cdot 10^{-6}$	30	$6,4 \cdot 10^{-2}$	35	$15,6 \cdot 10^{-5}$
4	2,6	172	1	$12,5 \cdot 10^{-6}$	15	$3,25 \cdot 10^{-2}$	17,5	$7,8 \cdot 10^{-5}$
	10,3	350	2	$6,25 \cdot 10^{-6}$	30	$6,45 \cdot 10^{-2}$	35	$31,2 \cdot 10^{-5}$
8	2,6	350	0,5	$25 \cdot 10^{-6}$	30	$6,5 \cdot 10^{-2}$	35	$7,8 \cdot 10^{-5}$
	22	360	4	$3,1 \cdot 10^{-6}$	30	$6,7 \cdot 10^{-2}$	35	$62,4 \cdot 10^{-5}$

Примечание. В числителе — параметры моделирования напряжения на взрыве проводника, в знаменателе — параметры моделирования отключаемого тока.

В изученной области изменения масштабов моделирования n и n_1 предсказываемые параметры лежат в пределах точности эксперимента $\sim 10\%$ (см. таблицу). Период собственных колебаний LRC -контура составлял 22,1 мкс. Магнитный поток при изменении $n_1 = 1 \div 8$ раз составил $6,5 \cdot 10^{-2}$ Вб, а при $n = 1 \div 8$ изменялся пропорционально n . Величина запасаемой энергии в накопителе и объеме проводника пропорциональна изменению масштабов моделирования. При проведении экспериментов внешние условия сохранялись за счет взрыва проводников в воздухе, а конструктивные — за счет набора проводников одинакового диаметра.

Сопоставление полученных данных показывает, что с помощью системы (4) с достаточной для практики точностью можно воспроизводить характеристики электрического взрыва проводника в заданном масштабе, в первой четверти периода собственных колебаний установки. Описанные примеры могут быть использованы не только при расчете отключающих устройств индуктивных накопителей [14—16], но и при воспроизведении характеристик волн сжатия [10], возникающих при взрыве, и в других случаях.

Поступила в редакцию
17/XI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Павловский, В. А. Васюков, А. С. Руссков. Письма в ЖТФ, 1977, 3, 16, 789.
2. Е. И. Биченков, В. А. Лобанов. ПМТФ, 1975, 1, 66.
3. А. С. Герасимов, В. И. Икряников, А. И. Пинчук. ПМТФ, 1975, 1, 55.
4. Ю. Д. Бакулин, В. Ф. Куропатенко, А. В. Лучинский. ЖТФ, 1976, 46, 9, 1963.
5. H. Knoepfel, R. Luppi. Exploding wires. Eds. by W. Chace and H. Moore. N. J., Plenum press, 1968.
6. Е. И. Азаркевич. ЖТФ, 1973, 43, 141.
7. Ю. А. Котов, В. С. Седой.— В сб.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков/Под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1976.
8. Р. Рейтель, Дж. Блекборн.— В сб.: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: ИЛ, 1965.
9. Г. А. Месяц. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
10. Д. Келлер, Дж. Иеннинг.— В сб.: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: ИЛ, 1965.
11. Ф. Узбб, Г. Хилтон и др.— В сб.: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: ИЛ, 1965.
12. M. Friedman, M. Ury. Rev. Sci. Instrum. 1977, 48, 3, 279.
13. Ю. А. Котов, В. С. Седой.— В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Вып. 2. Чебоксары, 1972.
14. В. А. Барихин, В. И. Кашинцов и др. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 17, 1416.
15. В. А. Барихин, В. И. Кашинцов и др. Квантовая электроника, 1979, 4, 127.
16. В. И. Кашинцов. Авт. свид. № 635605; Бюл. изобр., 1978, 44, 198.