

УДК 621.793:533.9

## Исследование параметров электрических дуг в каналах многовитковых электродинамических ускорителей

А. П. Глинов, Ю. Г. Дёгтев, А. К. Кондратенко,  
А. Е. Полтанов, В. Н. Рындин, Г. И. Симонова  
ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Троицк Московской обл., Россия

*Получены данные о физических параметрах системы свободно движущихся электрических дуг, соединенных последовательно в электрическую цепь. Рассмотрены устойчивость синхронного движения электродуговой системы и эффекты вторичного образования дуг. Результаты исследования могут найти применение при разработках различных электродуговых установок.*

Устройства на базе системы синхронно движущихся электрических дуг, аналогичных многовитковым ускорителям с плазменным поршнем, могут найти применение в энергетике и ряде технологических процессов.

В энергетике подобные плазменные установки могут использоваться как быстродействующие ограничители и выключатели токов короткого замыкания [1, 2]. Эти токи растут с увеличением мощностей энергосистем, что вызывает отказ в срабатывании обычной защитной аппаратуры. Одним из вариантов решения этой проблемы может быть использование дуговых ограничителей тока. Такие устройства относительно просты в изготовлении, энергоёмки, имеют малые габаритные размеры, позволяют контролировать уровень сетевых перенапряжений и обладают невысокой стоимостью.

Традиционный рельсовый ускоритель можно использовать как насос для прокачки газовой среды [3, 4]. Производительность таких насосов ограничивается эффектом просачивания части газа за фронтом ударной волны перед плазменным поршнем в зону пониженного давления с тыльной стороны якоря [5, 6]. Однако использование узких каналов, обеспечивающих щелевые разряды, позволяет снизить негативное влияние просачивания до минимума.

На рассматриваемой технической базе возможно создание и комбинированных систем нагрева и прокачки газа, которые могут найти применение при дегазации вредных химических соединений, экологически опасных газообразных продуктов. Возможна и разработка устройств по очистке металлических поверхностей от диэлектрических пленок [7].

### Электродуговая установка и схема измерений

Исследование физических процессов движения системы дуг в воздухе проводилось на разработанном в ТРИНИТИ шестивитковом плазменном ускорителе [1], где смежные каналы разделены изоляционными перегородками (рис. 1).

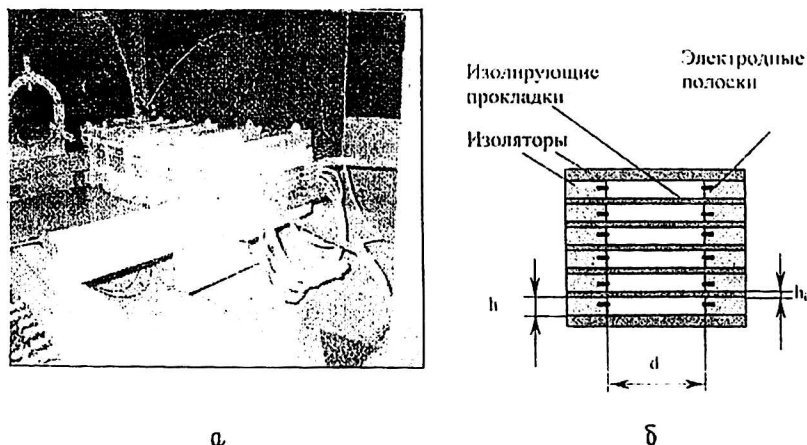


Рис. 1. Многовитковый плазменный ускоритель:  $N = 6$ :  
 а — общий вид плазменного ускорителя; б — поперечное сечение

Дуги последовательно замыкают электрическую цепь и свободно ускоряются в щелевидных каналах, расположенных параллельно. Поперечное сечение каждого канала  $h \times d$ . Величина  $h$  менялась от 11 до 5 мм. Межэлектродное расстояние  $d = 80$  мм. Погонная индуктивность ускорителя  $L' = 24$  мкГн/м. Если не оговорено противное, электроды выполнены из высокоомного материала (нержавеющей стали) в виде полосок сечением  $1 \times 9$  мм<sup>2</sup>.

Для инициирования дуг на входе каждого канала было обеспечено сужение межэлектродного расстояния до 52 мм и устанавливалась медная проволочка диаметром 0,75 мм. Через тиристорный ключ и дроссель  $L = 100$  мкГн ускоритель подсоединялся к конденсаторной батарее  $C = 0,024$  Ф напряжением 2,5—3,5 кВ. При подаче напряжения происходил взрыв медных проволочек и возникали шесть дуг, которые начинали двигаться по каналам под действием собственного магнитного поля.

В экспериментах фиксировались следующие параметры: общий ток  $I$ , общее входное напряжение  $U_{вх}$ , напряжения на входе и выходе каждого канала, падения напряжения на электродах ( $\Delta U_э$ ) и в столбе плазмы ( $\Delta U_п$ ). Первая группа зондов для замера падения напряжения на электродах находилась на расстоянии 310 мм от места поджига дуги, а вторая — 570 мм. В каждой группе на электродах устанавливалось по пять зондов с шагом 10 мм. Схема расположения зондов представлена на рис. 2. Зонды для измерения потенциалов в столбе дуги устанавливались только на крайнем верхнем канале.

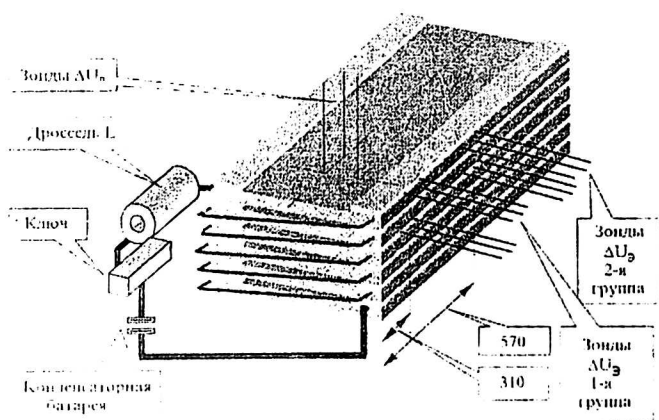


Рис. 2. Схема расположения измерительных зондов

Проведено более 60 экспериментов, которые показали, что данный плазменный ускоритель может быть использован в качестве ограничителя и размыкателя тока в энергосистеме. С помощью данного макета удавалось за время 7-8 мс не только ограничивать, но и отключать токи 8—13 кА при напряжении источника питания до 3 кВ.

### Экспериментальные результаты

Дуги возникали через 0,85—0,87 мс после подачи напряжения ( $U = 3$  кВ) при токе 6,5 кА и входном напряжении  $U_{вх} = 2,2$  кВ. Напряжение на дугах  $U_d = 320$  В. Далее (0,1—0,12 мс) ток примерно постоянен,  $U_{вх}$  — до 2,5 кВ, а  $U_d$  — до 420 В. Затем (0,25—0,3 мс) напряжение  $U_{вх}$  практически постоянно,  $I \sim 5,5$  кА, а напряжение на дугах  $U_d$  310 В на 1-м и 2-м каналах и 370 В — на 3-м канале. Стабильное горение дуги наблюдалось во временном интервале от 1,2—1,25 мс до 2,9—2,95 мс. Далее в течение 0,5—0,6 мс горение дуги было неустойчивым. При этом  $U_{вх} = 1,9$ —2,0 кВ, а  $U_d = 150$ —170 В. По истечении 3,5 мс от начала пуска происходило гашение дуги — ток быстро уменьшался от 1 кА до 150 А за 0,25 мс. Напряжения на стабильных дугах в 1-м и 2-м каналах практически совпадают. На 3-м же канале  $U_d$  на 15—20 В выше. Скорость движения дуги  $V$  в узле поджига составляет 650—700 м/с. Введение дополнительной измерительной зоны при  $x = 140$  мм от места поджига показало, что там  $V = 580$  и 550—600 м/с на входе и выходе, соответственно. При  $x = 310$  мм  $V \sim 120$ —170 и 110—160 м/с на входе и выходе из измерительной зоны, соответственно. При  $x = 570$  мм,  $V \sim 100$ —150 м/с на входе в зондовый участок и до 70—110 м/с — на выходе из него.

Дуга достигает 1-й группы зондов в ядре потока быстрее, чем на электродах. Однако 2-я измерительная зона проходится ею позже в ядре потока, т. е. на начальном участке каналов столб дуги изогнут вперед по направлению движения. Возможно это обусловлено выбросом плазмы при взрыве проволоки. На выходе же дуга прогибается под действием силы аэродинамического сопротивления.

При установке (200 мм от выходного сечения каналов) дугогасителей или изоляционных пластин толщиной 3 мм или при сужении каналов по всей длине на 2 мм амплитуда тока  $I_m$  и скорость  $V$  на 1-й группе зондов практически не изменяются. Но 2-й группы зондов дуга не достигала, а снижение тока было в 1,5 раза быстрее. Когда вместо шести использовались только три канала ускорителя,  $I_m$  возросла в 1,5—2 раза, а  $V$  — в 2—2,2 раза.

При замене стальных электродов на медные в пусках с тремя каналами максимальный ток  $I_{max}$  вырос на 30—50 %, а  $V$  — в 1,5—2 и в 1,3 раза для 1-й и 2-й измерительной зоны, соответственно.

Типичные режимы ограничения и отключения тока приведены на рис. 3.

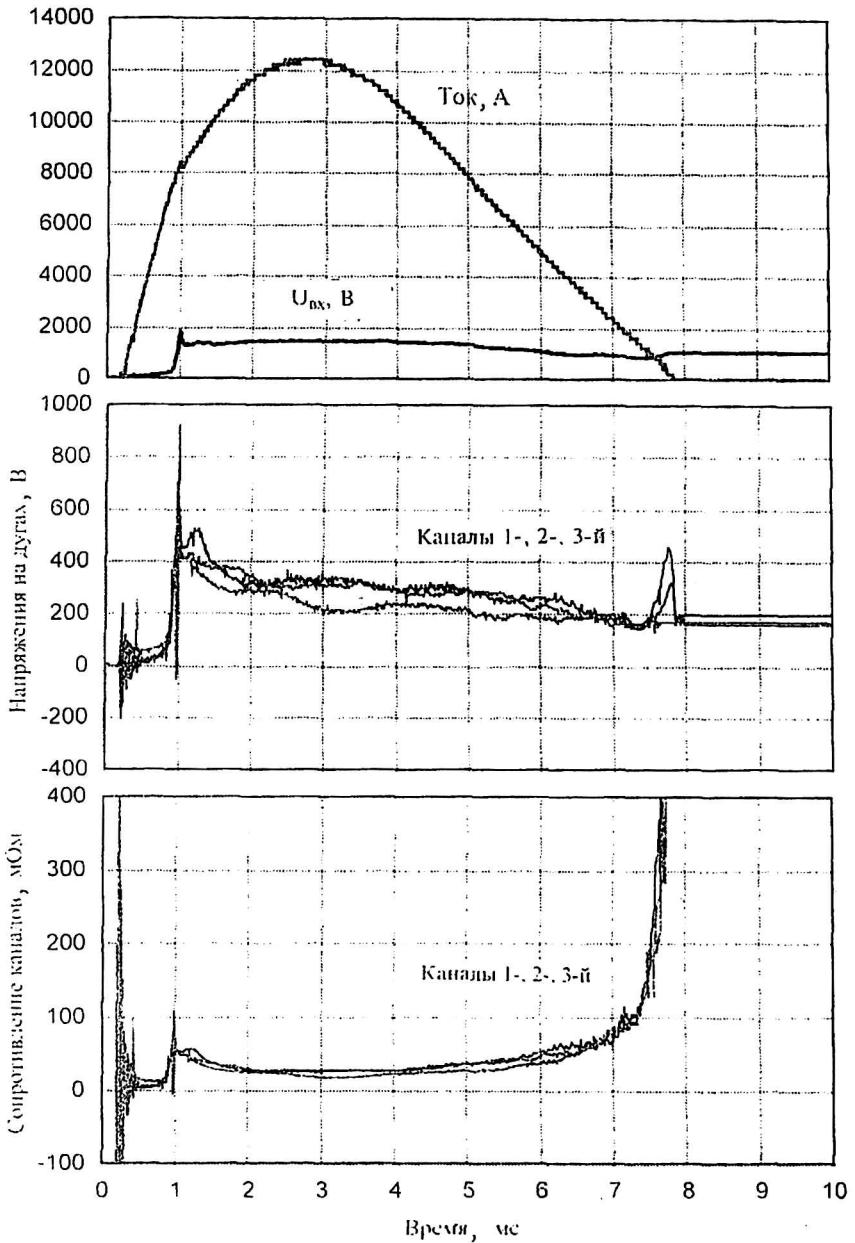


Рис. 3. Режимы ограничения и отключения тока ( $U = 3$  кВ)

### Параметры дуговых разрядов

В основу интерпретации результатов измерений положена модель плазменного поршня (ПП) [7, 8] в квазистационарном приближении. В отличие от модели, изложенной в работе [7], здесь учитывается зависимость оптических характеристик ПП от температуры, а вольт-амперные характеристики дуги берутся из экспериментов. Нагревание воздуха, окружающего плазмен-

ный поршень, не анализируется. Наклоном дуг по отношению к электродам пренебрегаем.

Модель ПП может быть представлена в виде системы (1)–(6)

$$Id = l_k w_{\Omega k} U_k; \quad (1)$$

$$m_k R_g T_k = p_k w l_k d_{\Gamma \text{ПП}}; \quad (2)$$

$$IU_k = 2\varepsilon_k \sigma_{Sb} T_k^4 [dV + (d + w)l_k]; \quad (3)$$

$$p_k = p^*_{k} + \frac{\mu_0 I^2}{8(w + l_k)^2}; \quad (4)$$

$$L'_k \frac{I^2}{2} = \zeta_k V_k^2, \quad k = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

$$\Omega^k = \Omega^k(p_k, T_k), \quad \varepsilon^k = \varepsilon^k(p_k, T_k, l_k), \quad \zeta^k = \zeta^k(V_k, m_k, d, w). \quad (6)$$

Здесь  $k$  — номер канала;

$p_k, p^*_{k}$  — давление ПП и уплотненного воздуха перед ним;

$I$  — электрический ток;

$U_k$  — падение напряжения на ПП;

$\sigma_k$  — электропроводность;

$l_k$  — протяженность столба дуги вдоль  $k$ -го канала;

$d$  — межэлектродное расстояние;

$w$  — ширина каналов;

$\varepsilon$  — степень черноты;

$\sigma_{Sb}$  — постоянная Стефана-Больцмана;

$V_k$  — скорости дуг;

$T_k$  — температура;

$m_k$  — масса;

$R_g$  — универсальная газовая постоянная;

$\mu_{\text{ПП}}$  — молекулярный вес ПП;

$L'_k$  — эффективная погонная индуктивность одной пары шин с учетом магнитной связи с остальными каналами;

$\mu_k$  — динамическая вязкость;

$\zeta_k$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума.

В модели (1) — закон Ома, в (2) — уравнение состояния идеального газа, в (3) — баланс мощности, в (4) — баланс магнитного и газодинамического давления, в (5) — уравнение баланса сил электромагнитных и аэродинамического сопротивлений, в (6) — даны, соответственно, зависимости электропроводности, степени черноты и коэффициента аэродинамического сопротивления от определяющих параметров плазменного поршня (ПП). Силой инерции в (5) можно было пренебречь для времен  $t$ , превосходящих величину  $t^* = 2mV/(LI^2)$ . Действительно, полагая массу ПП  $m = 1$  мг, его скорость  $V = 100$  м/с, эффективную погонную индуктивность одной секции  $L' = 4$  мкГн/м, ток  $I = 8$  кА, получим  $t^* \sim 1,5$  мкс.

Согласно визуальному анализу внутренних поверхностей каналов ускорителя, эрозия изоляторов и шин была незначительной. Поэтому предполагалось, что плазмообразующим газом токовых перемычек является воздух. Оптические характеристики воздуха брались из работы [9], а электропроводность определялась аналогично [7]. Аэродинамическое сопротивление ПП рассчитывалось с учетом лобового сопротивления и сопротивления трения ПП об электроды и изоляторы  $\zeta = \zeta_f + \zeta_w$  [10].

$$\zeta_{wk} = C_{fk} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{w} \right), \quad C_{fk} = 0,072 \operatorname{Re}_k^{-0,2}; \quad \operatorname{Re}_k = V_k l_k / \nu_k, \quad (7)$$

$$\nu_k = \mu / \rho_k, \quad \rho_k = \frac{m_k}{dwl_k};$$

$$\zeta_{fk} = \begin{cases} \frac{(p_{*k} - p_0)dw}{V_k^2}: V_k \geq a_0, \\ \rho_k Cdw / 2, \quad C = C(d/w): V_k < a_0; \end{cases} \quad (8)$$

$$p_{*k} = p_0 \begin{cases} 1 + \frac{\gamma M_k}{2} \left[ \frac{\gamma + 1}{2} M_k + \sqrt{4 + \left( \frac{\gamma + 1}{2} M_k \right)^2} \right]; & M_k = \frac{V_k}{a_0}: V_k \geq a_0 \\ 1: & V_k < a_0 \end{cases} \quad (9)$$

Здесь  $\operatorname{Re}_k$  — число Рейнольдса;

$M_k$  — число Маха;

$a_0$  — скорость звука перед ПП;

$\gamma$  — показатель адиабаты;

$p_0$  — давление невозмущенного воздуха перед ПП;

$C_{fk}$  — коэффициент трения в пограничном слое;

$\rho_k$  — массовая плотность;

$\nu_k$  — кинематическая вязкость.

Эффективные погонные индуктивности по секциям ускорителя могут быть рассчитаны как

$$L_k = L_0 + \sum_{j=1}^N M'_{kj}. \quad (10)$$

Здесь  $L_0$  — погонная собственная индуктивность одной секции ускорителя;

$M'_{ki}$  — погонные взаимные индуктивности  $k$ -й и  $j$ -й секций.

Эти величины вычислялись согласно справочному руководству [11].

Результаты численного моделирования представлены на рис. 4.

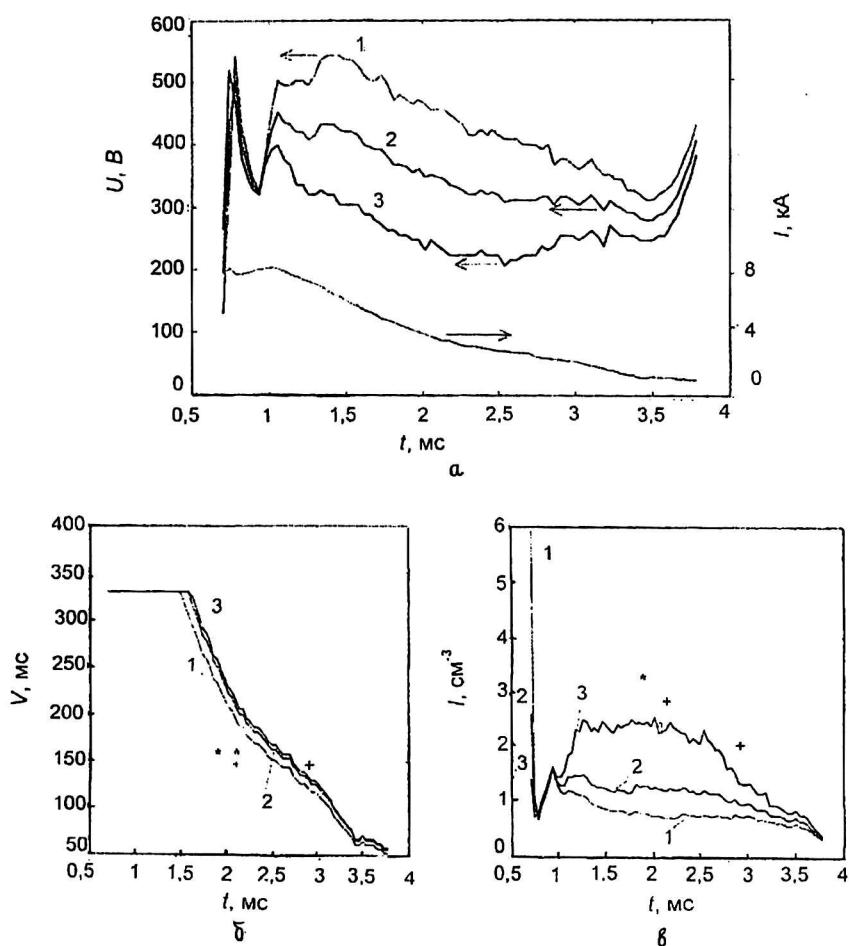


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов:

а — экспериментальные значения тока и напряжения на плазменных перемычках (цифрами отмечены номера каналов);

б — скорость дуг. — — численное моделирование. Экспериментальные данные по каналам: № 1 — "+"; № 3 — "\*";

в — толщины дуг; — — расчет; "+" — замер по каналу № 1; "\*" — замер по каналу № 3

При этом численное моделирование параметров дуг, согласно модели (6)—(10), было проведено с использованием экспериментальных вольт-амперных характеристик (см. рис. 4, а). Цифрами отмечены номера каналов. Ввиду симметрии ускорителя каналы 1—6, 2—5, 3—4 являются идентичными, поэтому результаты приведены только для первых трех каналов.

Задания тока  $I$  и напряжения  $U$  на ПП по каждой секции достаточно для замыкания указанной системы уравнений. Видно, что расчетные и экспериментальные данные по продольным размерам плазменных поршней  $l_k$  (см. рис. 4, в) и их скоростям  $V_k$  (см. рис. 4, б) согласуются неплохо.

Зная кривую тока  $I(t)$  и продольные размеры дуг, можно определить среднюю плотность тока  $J$  в ПП. Она лежит в пределах 1—10 кА/см<sup>2</sup>. Давление в дугах  $p$  составляет 0,1—0,14 МПа. Вычисления показали, что электропроводность  $\sigma$  отслеживает изменение температуры  $T$ , так как вариации давления незначительны. При этом более крайние дуги, отвечающие на рисунках меньшим номерам, имеют меньшую толщину  $l$  и массу  $m$  и большую темпе-

ратуру  $T$  и электропроводность  $\sigma$  по сравнению с центральными дугами. Крайние дуги движутся по каналам несколько медленнее. Это обусловлено тем, что магнитное поле в центральной части ускорителя несколько выше, чем на периферии. Этот результат прослеживается также и в экспериментах.

Проведенное численное моделирование пространственно-временного распределения параметров системы дуг и сопоставление расчетных и экспериментальных результатов по протяженности и скорости плазменных образований показали, что в каналах ускорителя формируются движущиеся, постепенно затухающие плазменные образования протяженностью несколько сантиметров, с плотностью тока в диапазоне 1–10 кА/см<sup>2</sup>, температурой 14–30 К, удельным электрическим сопротивлением 0,1–0,3 Ом·мм, давлением 1–1,4 атм и скоростью продольного перемещения от 330 до 50 м/с.

### Анализ синхронности движения дуг

Эксперименты показали отличие параметров электрических дуг в разных каналах ускорителя. С учетом этого электротехническая модель макетного  $N$ -канального ускорителя имеет вид (11–15)

$$(L_0 + L_a + L_r) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL_a}{dt} + \sum_{k=1}^N [(L'_{ef,k} V_k + R'_k x_k) I + U_{ak} + U_{ek}] = U_c; \quad (11)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{1}{C}, \quad L_r = \sum_{k=1}^N (L'_k x_k + \sum_{j=1}^N M_{kj}) = \sum_{k=1}^N L'_{ef,k} x_k; \quad (12)$$

$$L_a = \sum_{k=1}^N (L_{ak} + \sum_{j=1}^N M_{kj}^a); \quad L'_{ef,k} = L'_k + \sum_{j=1}^N M'_{kj}; \quad (13)$$

$$m_k \frac{dV_k}{dt} = L'_{ef,k} \frac{I^2}{2} + \sum_{j=1}^N F_{kj}^a - \zeta V_k^2, \quad \frac{dx_k}{dt} = V_k; \quad (14)$$

$$F_{kj}^a = -I^2 \left| \frac{\partial M_{kj}^a}{\partial r_{kj}} \right| \frac{x_k - x_j}{r_{kj}}; \quad r_{kj} = \sqrt{(x_k - x_j)^2 + h_{kj}^2}. \quad (15)$$

Здесь  $I$  — электрический ток;

$U_c$  — напряжение на емкости  $C$ ;

$U_{ak}, U_{ek}$  — падения напряжения в дуговом столбе и приэлектродных зонах  $k$ -го ПП ( $k=1, 2, \dots, N$ );

$L_0, L_r, L_a$  — соответственно, индуктивности источника тока, ускорителя и системы электрических дуг;

При этом  $L_{ak}$  — собственная индуктивность  $k$ -го ПП;

$L'_{ef,k}$  и  $R'_{ek}$  — эффективная погонная индуктивность и погонное сопротивление  $k$ -й пары шин;

$M_{kj}$  и  $M_{ki}^a$  — взаимные индуктивности пар шин и дуг.

Величина  $M'_{kj}$  представляет собой погонные взаимные индуктивности  $k$ -й и  $j$ -й пар шин. Через  $m_k, V_k, x_k$  обозначены, соответственно, их массы, скорости и координаты местоположения.

Правая часть первого уравнения (14) — это баланс наиболее важных сил, действующих на дуги, а именно, сила электродинамического разгона, сила взаимного притяжения разных дуг и сила аэродинамического сопротивления. При этом величина  $r_{kj}$  — расстояние между центрами дуг, выражаемое через расстояния между центрами каналов  $h_{kj}$ .

Предварительный анализ движения системы дуг в каналах показывает, что в режиме квазистационарного тока можно обеспечить синхронное движение дуг, если эффективные погонные индуктивности  $L'_{ef,k}$  различных рельсовых пар разнятся несильно. В проведенных расчетах (рис. 5) это отличие не превышало 20 %. Различием размеров, масс и падений напряжений на дугах пренебрегалось:  $l_k = l_* = 5$  см;  $m_k = m_* = 0,4$  м;  $U_{ak} = U_* = 300$  В. Проанализированы три варианта движения дуг при заряде батареи 3 кВ для различных начальных возмущений. В первом варианте все дуги инициировались одновременно при достижении критического тока взрыва фольги  $I_* = 5,5$  кА, во втором и третьем вариантах старт дуг искусственно задерживался, соответственно, в первом и третьем каналах увеличением критического тока на 20 %.

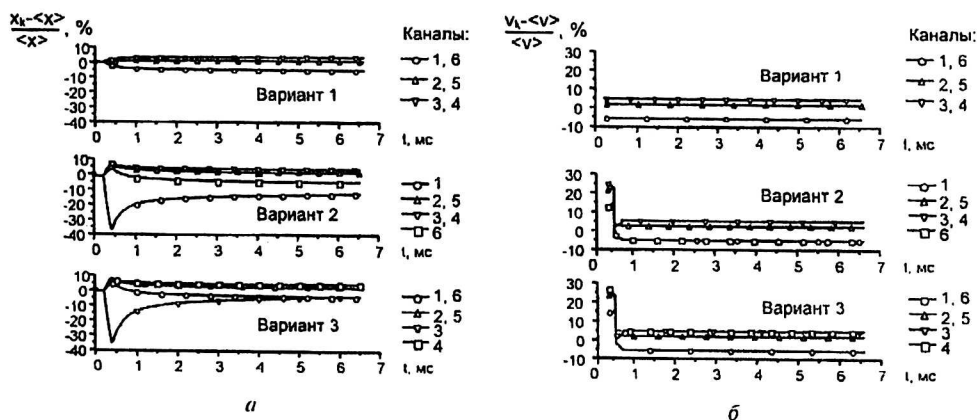


Рис. 5. Мера синхронности движения дуг.  
Символами  $\langle \rangle$  обозначены средние величины параметров:  
а — пройденный путь; б — скорость

Результаты расчетов для первого—третьего вариантов разнятся до 35 % при начальных временах. При  $t > 3$  мс эта разность снижается до 5 % и постепенно затухает. Отклонение от синхронности движения дуг  $< 10$  %, что свидетельствует об удачном инженерном решении конструкции установки [2, 12].

### Вторичные дуги

При продвижении дуг по каналам ускорителя с резистивными шинами происходит нарастание электрического напряжения в межэлектродных зазорах, что может при определенных условиях привести к нарушению электрической прочности каналов. Пробойное напряжение  $U_b$  в воздушной среде составляет  $\sim 30$  кВ/см и 300 В/см, соответственно, при атмосферном давлении и в зонах сильного разряжения [13]. Зоны сильного разряжения при движении поршня в воздушной среде возникают при скоростях  $\sim 1,7$  км/с [3]. В рассмотренных нами режимах плазменного ускорителя скорости дуг существенно меньше. Однако с увеличением рабочего тока устройства такие скорости могут быть достигнуты.

Падение напряжения в месте предполагаемого образования шунтирующей дуги в  $k$ -м канале можно представить в виде

$$U_{p,k} = L'_k (x_a - x_{p,k}) \frac{dI_{a,k}}{dt} + R'_k (x_a - x_{p,k}) I_{a,k} + L'_k (V_a - V_{p,k}) I_{a,k} + U_{a,k}. \quad (16)$$

Проведенные на основе (16) оценки при плавном изменении тока, при  $L' = 24$  мкГн/м,  $R' = 1,2$  Ом/м,  $N = 6$ ,  $d = 80$  мм,  $I = 10$  кА показывают, что критическая длина ускорителя для пробоя в плотной среде  $\sim 24$  м.

### Заключение

Теоретически и экспериментально показано, что в многовитковом плазменном ускорителе рельсотронного типа обеспечивается стабильное синхронное движение дуг в широком диапазоне рабочих токов от нескольких килоампер до сотен ампер. Получены данные о скоростях движения дуг, их размерах и сопротивлениях. Проведено численное моделирование пространственно-временного распределения параметров системы дуг. Результаты работы могут найти применение при разработке ряда электродуговых устройств, таких как ограничители тока короткого замыкания в мощных энергосетях, аппараты электродуговой очистки поверхностей металлов и газов от токсичных примесей, комбинированные системы нагрева и прокатки газа.

### Литература

1. Poltanov A. E., Glinov A. P., Kondratenko A. K., Ryndin V. N. // IEEE Trans. Magn., 2001. № 3. P. 229.
2. Полтанов А. Е., Глинов А. П., Кондратенко А. К., Рындин В. Н. Устройство для ограничения и отключения тока электрической цепи: Патент РФ, 2158459 от 26.05.1998.
3. Глинов А. П., Кондратенко А. К., Полтанов А. Е., Рындин В. Н., Селяндин Б. Д.: Препринт ТРИНИТИ, № 0017-А, ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1995.
4. James J. Method and apparatus for pumping a medium: Patent USA, 5256036, Oct. 26, 1993.
5. Тушко Ю. В. // Изв. СО АН СССР, Сер. Техн. наук. 1987. № 15. Вып. 4. С. 70.
6. Тушко Ю. В. // Матер. 1-го Всес. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. — Новосибирск, 10—13 апреля, 1990. С. 122.
7. Глинов А. П., Дегтев Ю. Г., Кондратенко А. К., Полтанов А. Е., Рындин В. Н., Симонова Г. И. // Прикладная физика. 2001. №3. С. 58.
8. Глинов А. П.: Препринт ИАЭ-5088/1. — М., 1990.
9. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. Физические величины: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справоч. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей // Справочная книга. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
12. Poltanov A. E., Kondratenko A. K., Ryndin V. N., Glinov A. P. // IEEE Trans. Magn., 2001. № 1. P. 457.
13. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.

## **Study of electrical arcs parameters in multi-turn railgun channels**

*A. P. Glinov, Y. G. Dyogtev, A. K. Kondratenko, A. E. Poltanov,  
V. N. Ryndin, G. I. Simonova*

TRINITY State Research Center, Troitsk, Moscow Region, Russia

*Data on physical parameters of the system of freely driven electrical arcs, joint sequentially in an electrical circuit, are obtained. Considered were a stability of synchronous driving of the electric arc system and effects of secondary formation of arcs. Outcomes of the research can find an application for development of various electric arc installations.*