

УДК 621.314.6

## Повышение взрывобезопасности систем управления и автоматизации рудничного электрооборудования путем снижения энергии искрения при импульсном питании

*Показано, что при импульсном питании индуктивных нагрузок энергия искрения в питающих линиях меньше, чем при питании постоянным током. Это способствует повышению взрывобезопасности электрооборудования угольных шахт, опасных по газу.*

Искробезопасная электрическая цепь – один из видов обеспечения взрывобезопасности электрооборудования, которое по условиям эксплуатации должно функционировать даже во взрывоопасной атмосфере. Доказано, что искробезопасность линий, питающих индуктивные нагрузки, может быть повышена при использовании импульсного питания [1, 2]. Это положение базируется на особенностях такого питания, состоящих в том, что ток в линии протекает от источника к нагрузке только в течение импульса напряжения, а во время паузы ток отсутствует, так как линия и источник заперты диодными заградителями под действием обратного напряжения, а запасенная в индуктивной нагрузке энергия разряжается благодаря шунтирующему диоду в собственной цепи. Рассматривая эффект от шунтирования, В. С. Кравченко в работах [3, 4] объяснил, что диодный шунт образует замкнутый контур, в котором гасится энергия индуктивности. При этом принята во вни-

мание только цепь постоянного тока. Кроме того, не решен вопрос о предельной энергии искрения, хотя интенсивность его в цепи определяется значением энергии в процессе искрообразования при коммутации. Поэтому оценка энергии искрения – актуальная задача.

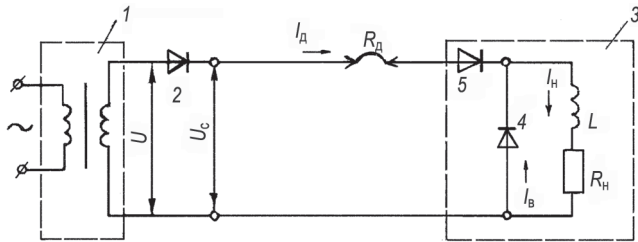
В статье [5] дана оценка энергии искрения в системе импульсного питания с двухфазным выпрямителем тока. Однако во многих случаях может быть применена и система импульсного питания с однофазным выпрямителем. Она отличается большей простотой и перспективна для схем управления различными электрическими аппаратами и для систем автоматизации разных технологических процессов.

В целях определения предельной энергии дугового разряда при коммутации в проводах линии импульсного питания индуктивной нагрузки с однофазным выпрямителем тока по сравнению с питанием постоянным током проведены эксперименты. Исходными данными были результаты исследований разработанной системы импульсного питания с однофазным выпрямлением переменного тока (рис. 1). Схема построена на однофазном трансформаторе 1; выпрямительном диоде 2, формирующем импульсы напряжения; индуктив-



**А. В. КОЛОСЮК,**  
канд. техн. наук  
(МакНИИ)

ной нагрузке 3, которая снабжена искрозащитным элементом с диодами шунтирующим 4 и запирающим (заградительным) 5 [2]. На схеме дуговой разряд показан в виде сопротивления  $R_d$ ;  $U$  – действующее (эффективное) напряжение вторичной обмотки трансформатора;  $U_c$  – среднее выпрямленное напряжение;  $I_d$  – ток дугового разряда;  $I_H$  – ток в нагрузке;  $I_B$  – ток в шунтирующем диоде (вентиле);  $L$  – индуктивность нагрузки;  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки.



**Рис. 1.** Электрическая схема дугового разряда для систем импульсного питания.

Из осциллограмм мгновенных значений токов в системе с однофазным выпрямлением видно, что ток в линии имеет форму импульсов (рис. 2, а). Ток в нагрузке постоянный и непрерывный (рис. 2, в), хотя и пульсирующий. Ток нагрузки является суммой токов, поступающих из линии во время импульса питающего напряжения (рис. 2, а) и тока от ЭДС самоиндукции нагрузки (рис. 2, б), которая разряжает энергию во время паузы питающего напряжения.

Сравнение систем постоянного и импульсного токов целесообразно выполнить при условии, что напряжение питания  $U_H$  постоянным током равно среднему выпрямленному напряжению питания импульсным током  $U_c$ :

$$U_c = U_M / \pi = \sqrt{2} U / \pi, \quad (1)$$

где  $U_M$  – амплитудное линейное напряжение;  $U$  – действующее напряжение вторичной обмотки трансформатора [2].

Расчетные параметры системы определены для таких условий: напряжение  $U = 24$  В; активное сопротивление цепи  $R = 10$  Ом; ее индуктивность  $L = 0,1$  Гн (индуктивное сопротивление  $X$  при частоте  $f = 50$  Гц составляет  $X = 2\pi fL = 31,4$  Ом).

Рассмотрим искрение в системе питания постоянным током (рис. 3) при разрыве линии, которое сопровождается дугой.

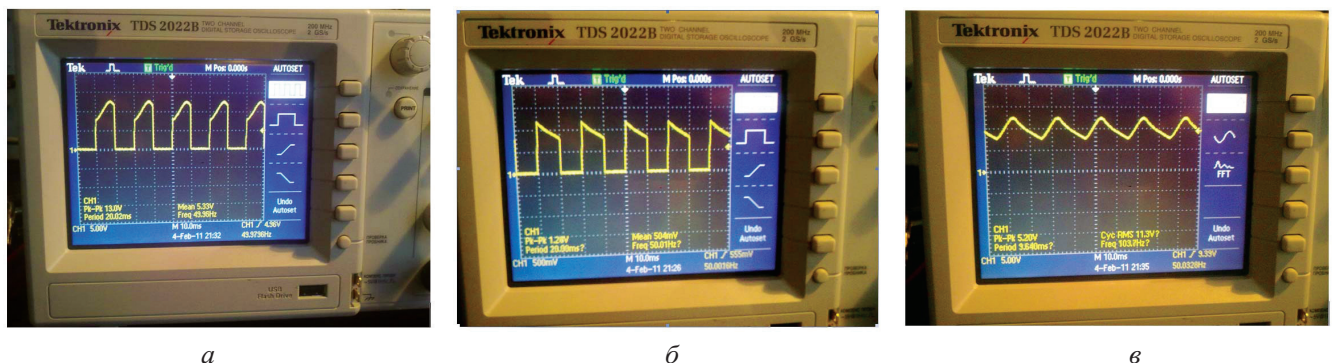
При постоянном токе энергия, выделяемая в искре при дуговом разряде, состоит из энергии, поступающей от источника, и энергии, запасенной в магнитном поле отключаемой цепи. Процесс искрообразования характеризуется возникновением дугового разряда между коммутируемыми электродами электрической цепи, ток в которой снижается во времени от начального значения тока до тока погасания дугового разряда.

Энергия, выделяющаяся в дуге при отключении постоянного тока, определяется [6] из выражения

$$W_d = W_c + W_m = L(I^2/2)[1 + 2k(\tau_1/\tau)], \quad (2)$$

где  $W_c = \int_0^{\tau_1} R(I-i)^2 dt = LI^2k(\tau_1/\tau)$  – энергия, поступающая от источника в искру при начальном значении тока  $I_0$  [6];  $W_m = L(I^2/2)$  – энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой цепи;  $k$  – коэффициент (значение приведено в работе [6]);  $\tau_1$  – длительность дугового разряда;  $\tau = L/R$  – постоянная времени отключаемой цепи;  $R$  – активное сопротивление цепи.

При нормальном режиме работы сопротивление  $R_H$  в цепи обуславливает протекание тока нагрузки  $I_H$ . При возникновении дугового разряда добавляется сопротивление дуги  $R_d$ , которое независимо от рода тока можно считать активным [6], но зависящим от напряжения  $U_d$  и тока  $i$ :  $R_d = U_d/i$ . Сопротивление дуги  $R_d$  изменяется в широких пределах, однако целесообразно рассмотреть случай, при котором энергия устойчивой дуги максимальна. Исследования показали, что для этого должны быть равными сопротивления дуги и на-



**Рис. 2.** Осциллограммы токов при импульсном питании индуктивной нагрузки: а – ток в линии от источника питания; б – ток в шунтирующей цепи, генерируемый ЭДС самоиндукции нагрузки; в – ток в цепи индуктивной нагрузки.

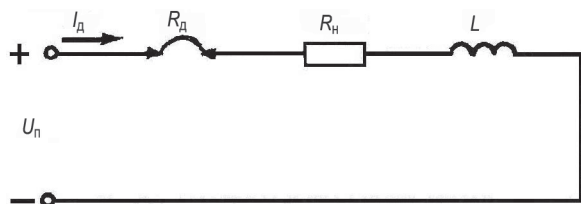


Рис. 3. Электрическая схема дугового разряда для цепей с индуктивной нагрузкой при постоянном токе.

грузки нормального режима цепи  $R_d = R_n$ . Можно принять, что  $R = R_d + R_n = 2R_n$ . Из формулы (2) следует, что энергия дугового разряда зависит от начального тока и индуктивности цепи. Для системы питания постоянным током начальным является установившееся значение, т. е.  $I = U_n / R$ . Индуктивное сопротивление цепи не влияет на установившийся ток. Коэффициент  $k$  зависит от некоторой постоянной [6]. При исследованиях будем исходить из максимального  $k = 0,17$ , так как при меньших его значениях энергия будет меньше.

Для системы импульсного питания в качестве начального значения тока целесообразно принять максимальный.

Поскольку ток в линии присутствует лишь в течение импульса напряжения источника и отсутствует во время паузы, энергия искрения определяется только энергией, поступающей из источника [6]:

$$W'_d = L(I')^2 k(\tau_1 / \tau) \text{ или } W'_d = (I')^2 k R \tau_1, \quad (3)$$

где  $I'$  – начальное значение тока, соответствующее максимальному мгновенному току импульса.

Длительность дугового разряда при импульсном питании зависит от отношения  $m = X/R$  – индуктивного сопротивления к активному и определяется как разность длительности импульса  $T/2$  и времени  $t_{max}$  наступления максимума тока:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= T/2 - t_{max} = T/2 - T(1/4 + \arctg m/2\pi) = \\ &= T(1/4 + \arctg m/2\pi). \end{aligned} \quad (4)$$

В системе питания постоянным током пауза отсутствует, и время дугового разряда зависит от периода начала снижения тока до тока погасания дуги. При практических расчетах считается, что переходный процесс заканчивается за  $t = (3 \dots 4) \tau$ . Это время также зависит от отношения индуктивного сопротивления цепи к активному, а длительность дугового разряда возрастает с увеличением индуктивного сопротивления цепи. Хотя при постоянном токе время горения дуги может быть значительно больше, чем при импульсном. Для сравнения примем, что оно одинаковое.

По полученным формулам в таблице приведены данные для сравнения энергии дугового разряда при условии  $U_c = U_n = 24 \text{ В}$ ,  $R = R_d + R_n = 20 \text{ Ом}$  в схемах

с применением импульсного питания и схемах питания постоянным током.

С увеличением отношения  $m$  максимальное значение тока импульса  $I'$  снижается. Это вполне логично, так как при росте индуктивности повышается полное сопротивление цепи  $Z$ .

Полученные данные свидетельствуют: если в цепи постоянного тока с повышением индуктивного сопротивления энергия дугового разряда увеличивается, то при импульсном токе она уменьшается. Это объясняется тем, что при постоянном токе с увеличением индуктивности цепи возрастает доля энергии, поступающей в искру от разряда запасенной энергии в магнитном поле индуктивной нагрузки, а при импульсном токе приводит к уменьшению амплитуды тока и, следовательно, энергии, поступающей в искру от источника. То есть подтверждается вывод [2] о возможности повышения искробезопасности при использовании системы питания индуктивной нагрузки импульсным током.

Отношение  $W_d / W'_d = n$  показывает, во сколько раз при прочих равных условиях энергия дугового разряда в цепи постоянного тока больше, чем в цепи импульсного. В соответствии с выражениями (2) и (3) после упрощения получим:

$$n = W_d / W'_d = (I / I')^2 [(T / 4\pi k) m / \tau_1 + 1]. \quad (5)$$

Анализ показал, что при всех значениях  $m > 1,25$  энергия искры при импульсном токе меньше, чем при постоянном. Эффект в снижении энергии дугового разряда особенно получается, если индуктивное сопротивление цепи значительно превышает ее активное сопротивление. Так, при  $X \geq 2R$  энергия дугового разряда при импульсном питании в несколько раз меньше, чем в системе постоянного тока. Из полученных данных следует, что по условиям искробезопасности рациональной областью применения системы импульсного питания с однофазным выпрямлением переменного тока являются электрические цепи, в которых индуктивное со-

Отношение $m = X_n / R_n$	Энергия дугового разряда в искре, В·А·с, при токе		Отношение $W_d / W'_d$
	импульсном $W'_d$	постоянном $W_d$	
0	0,2145	0,049	0,228
0,5	0,143	0,094	0,650
1,0	0,107	0,140	1,308
1,5	0,066	0,186	2,82
2,0	0,049	0,232	5,52
2,5	0,029	0,278	9,58
3,0	0,0215	0,324	15,07
3,5	0,0162	0,370	22,8
4,0	0,0126	0,415	33,94

противление не менее чем в 1,25 раза больше активного.

В импульсных системах можно использовать и другие средства повышения искробезопасности, например отключение цепи или (и) шунтирование при коротком замыкании выходных цепей различными ключевыми элементами так, чтобы погасить энергию искрения в питающей линии и цепи нагрузки. При построении искробезопасных систем и их оценке исходят из минимальных воспламеняющих параметров цепи. Данные о минимальной воспламеняющей энергии приведены в ГОСТ [7]. Так, при длительности разряда  $\tau_1 = 5$  мс минимальная воспламеняющая энергия  $W_{\min} = 12$  мДж, если скорость размыкания контактов цепи 0,11 м/с, и  $W_{\min} = 8$  мДж, если скорость 0,046 м/с.

Минимальный воспламеняющий ток систем импульсного питания и постоянного тока можно определить, если воспользоваться данными ГОСТ [7], зависимостями между минимальной воспламеняющей энергией метановоздушной смеси (8,3 %  $\text{CH}_4$  + 91,7 % воздух) и длительностью разряда, а также скоростью размыкания контактов цепи. Условия решения: для системы импульсного питания с однофазным выпрямителем тока  $W'_d \leq W_{\min}$ , для системы питания постоянным током  $W_d \leq W_{\min}$ .

Необходимо учесть, что согласно ГОСТ 22782.5 минимальные воспламеняющие токи искробезопасных цепей установлены не по мгновенным, а по средним значениям. В работе [6] отмечается, что изменение тока в дуге при коэффициенте  $k = 0,167$  происходит по закону

$$i = I'(1 - t/\tau_1), \quad (6)$$

где  $I'$  – начальный ток дуги;

$t$  – текущее время процесса;

$\tau_1$  – время разряда, за которое ток снижается с начального значения до тока погасания дуги.

По среднему значению тока в дуговом разряде будет определяться минимальный воспламеняющий ток, т. е.  $I'_c = I'/2 = I'_b$ . С учетом этого

$$W'_d = (2I'_c)^2 k R \tau_1, \text{ или } W'_d = (2I'_b)^2 k R \tau_1. \quad (7)$$

Минимальный воспламеняющий ток

$$I'_b = \sqrt{W_{\min}/(4kR\tau_1)}. \quad (8)$$

Для системы постоянного тока начальный ток дугового разряда при прочих условиях равен среднему току системы импульсного тока. Поэтому минимальный воспламеняющий ток  $I'_b = I$ .

Таким образом, для системы постоянного тока

$$\begin{aligned} W_{\min} &= U^2 T / R(0,5m / 2\pi + k / 4) = \\ &= I^2 R T(0,5m / 2\pi + k / 4). \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда  $I_b = I = \sqrt{W_{\min}/RT(0,5m/2\pi + k/4)}$ .

Минимальную воспламеняющую энергию  $W_{\min}$  можно определить из графика (рис. А.20 приложения А в стандарте [7]), задаваясь длительностью разряда  $\tau_1$  согласно таблице.

Сравнение полученных результатов показывает, что для импульсного питания минимальные воспламеняющие токи выше, чем в системе постоянного тока. Это также свидетельствует о возможности повышения искробезопасности при импульсном питании.

**Выводы.** Обоснована методика определения энергии дугового разряда при искрении в питающей линии системы импульсного питания с однофазным выпрямлением переменного тока в сравнении с искрением в системе питания постоянным током.

В системе импульсного питания энергия дугового разряда в искре снижается с увеличением отношения индуктивного сопротивления цепи к активному, а в системе постоянного тока повышается, причем при значении указанного отношения более 1,25 энергия дугового разряда при искрении в системе импульсного питания ниже, чем в системе питания постоянным током. Полученные результаты подтвердили возможность повышения искробезопасности в линии, питающей индуктивную нагрузку, при применении импульсного питания взамен питания постоянным током.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колосюк А. В. Системы искробезопасного питания индуктивных нагрузок в шахтах // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. – Макеевка: Макеевка –Донбасс, 2005. – С. 140 –147.
2. Колосюк В. П. Импульсное питание электроустановок: энергосбережение и безопасность / В. П. Колосюк, А. В. Колосюк, В. В. Дорофиевко. – Донецк: ВИК, 2002. – 259 с.
3. Кравченко В. С. Воспламеняющая способность электрических разрядов при размыкании цепей тока промышленной, звуковой и ультразвуковой частоты / В. С. Кравченко // Электричество. – 1950. – № 1. – С. 59 – 61.
4. Кравченко В. С. Воспламеняющая способность электрического искрения / В. С. Кравченко // Электричество. – 1952. – № 9. – С. 21 –27.
5. Колосюк А. В. Энергия искрения в системах импульсного питания индуктивных нагрузок шахтного электрооборудования в сравнении с питанием постоянным током / А. В. Колосюк, В. П. Колосюк // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. – Макеевка: Макеевка – Донбасс, 2008. – № 1(21). – С. 101 –112.
6. Родштейн Л. А. Электрические аппараты низкого напряжения / Л. А. Родштейн. – М.: Энергия, 1964. – 363 с.
7. Электрооборудование взрывозащищенное. – Ч. II: Искробезопасная электрическая цепь  $i$ : ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99). – [Введен с 2001– 01 –01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 117 с. – (Госстандарт Российской Федерации).