

УДК 621.317.61:622.012.2

**И.В. Ковалева, В.В. Соболев**Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра горной электротехники и автоматикиНациональный горный университет, г. Днепропетровск  
кафедра строительства и геомеханикиE-mail, [inna\\_kovalyova@ukr.net](mailto:inna_kovalyova@ukr.net); [valeriysobolev@rambler.ru](mailto:valeriysobolev@rambler.ru)**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ДУГООБРАЗОВАНИЯХ В КОНТЕКСТЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В  
СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ШАХТЫ****Аннотация**

*Ковалева И.В., Соболев В.В. Анализ факторов воздействия при дугообразованиях в контексте моделирования коммутационных переходных процессов в силовой цепи электротехнического комплекса участка шахты. Исследованы и проанализированы электрохимические процессы при контакторной коммутации силовой цепи с учетом дугообразования в микроклимате взрывозащищенной оболочки. Обоснованы влияющие факторы при дугообразовании для моделирования коммутационных переходных процессов в электротехническом комплексе участка шахты.*

*Ключевые слова:* электрическая дуга, плазма, неуравновешенная система, азотистые соединения, контактор, коммутация.

**Общая постановка проблемы.**

Отличительной особенностью участка угольной шахты является нестационарность технологических установок, машин и механизмов; тенденция к повышению активной мощности асинхронных двигателей (АД) их электроприводов. Поэтому электротехнический комплекс такого участка отличается разветвлённостью кабельной сети; применением преимущественно гибких кабелей значительных длин и сечений. В стеснённых условиях горных выработок эксплуатация передвижного оборудования сопровождается частыми повреждениями гибких кабелей, что представляет реальную угрозу возникновения и развития коротких замыканий, создаёт предпосылки защитного отключения силового коммутационного оборудования. Однако наличие обратных энергетических потоков от включенных ранее асинхронных двигателей потребителей обуславливает необходимость дополнительных исследований процессов в подобных электротехнических комплексах с целью обоснования рациональных технических решений, повышающих эффективность обесточивания аварийных силовых электрических присоединений. В связи с этим важным является более точный учет факторов воздействия при моделировании коммутационных переходных процессов в силовой цепи электротехнического комплекса участка шахты.

В известных исследованиях отключение силовой цепи потребителя (группы потребителей) представлялось, как правило, мгновенным. В то же время, функционирование не вакуумных контакторов шахтных магнитных пускателей сопровождается дугообразованием, а сама конструкция этих контакторов имеет существенные отличия от конструкции контакторов общепромышленного назначения. Научный и практический интерес представляет изучение коммутационного процесса, сопровождаемого дугообразованием в контексте построения уточнённой модели состояний шахтного участкового электротехнического комплекса в процессе возникновения короткого замыкания и после защитного отключения питающего напряжения.

**Постановка задач исследования.**

Задачей исследования является обоснование исходных допущений при моделировании коммутационного переходного процесса в силовой цепи электротехнического комплекса участка угольной шахты, учитывающих особенности влияния дугообразования в контакторах рудничных коммутационных аппаратов.

**Решение задач и результаты исследований.**

Выявленный в ходе промышленной эксплуатации крайне низкий фактический ресурс шахтных пускателей, оснащённых общепромышленными контакторами поворотного принципа действия (базовая модель – КТ 7023У), обусловил поиск причин интенсивного износа изоляции элементов пускателя, находящихся внутри рудничного взрывозащищённого корпуса. Исследованиями установлено, что преждевременное разрушение изоляционных материалов в элементах такого пускателя связано с появлением агрессивных соединений внутри оболочки в течение некоторого времени эксплуатации. Сама атмосфера подземных горных выработок (температура, влажность, загазованность и запыленность) отрицательно влияет на состояние, ресурс и надежность электрооборудования. Однако, совместно с внешними факторами, в ограниченном объеме рудничных взрывозащищенных аппаратов формируется особый микроклимат, отличающийся от климата горных выработок. Причиной этого является открытая электрическая дуга, возникающая при коммутации подключенной к аппарату нагрузки. Основным компонентом, определяющим агрессивность микроклимата в аппарате, является выделяемый при горении электрической дуги атомарный азот, образующий при соединении с кислородом воздуха окислы азота:  $0,5 \cdot N_2 + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow NO$ . [1].

Взрывозащищенная оболочка аппарата препятствует свободному обмену внутренней микроатмосферы с атмосферой окружающей среды, способствует соединению окислов азота с парами воды и образованию азотной и азотистой кислот, которые, приводят к окислению контактных и подвижных соединений, снижению сопротивления изоляции проводников.

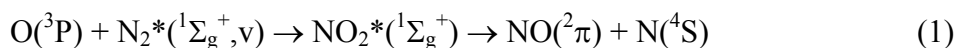
Таким образом, процесс дугообразования при контактной коммутации мощной активно-индуктивной нагрузки (асинхронного двигателя), может быть рассмотрен как высокоэнергетическое влияние на структуру вещества, обуславливающее изменение его состава, состояния и многих свойств.

Одним из способов, позволяющих заметить влияние на устойчивость и физико-химические свойства вещества, является электрический разряд в газах, где энергия электрического поля передается электронам слабоионизированной плазмы, которые, в свою очередь, обеспечивают сверхтепловое заселение возбужденных состояний атомов и молекул. Нейтральные молекулы, возбужденные электронами, могут стимулировать преобразования, происходящие в неуравновешенных плазмохимических системах [1,2].

В неуравновешенных системах, в том числе в электрическом разряде в газах кинетика химических процессов учитывает квантовую энергетическую структуру молекул и атомов, т.е. концентрацию каждого компонента в каждом энергетическом состоянии и канале химической реакции. Для неуравновешенной плазмохимии механизм колебательного возбуждения молекул электронным ударом характеризуется специфическим преимуществом, которое состоит в том, что этот механизм может стимулировать химические преобразования с наибольшей энергетической эффективностью. Следствием действия разрядного энергетического вклада является колебательная степень свободы молекул. Этот фактор обеспечивает высокую энергетическую эффективность процесса, т.е. колебательная энергия реагентов является наиболее эффективной в преодолении активационных барьеров элементарных реакций [3]. Окисление воздушного азота в плазме обусловлено высокой степенью колебательного возбуждения молекул в результате электронного удара. Образование в плазме оксидов азота является типичной эндоэргической цепной реакцией,

стимулированной колебательным возбуждением основного электронного состояния молекул в плазме.

Таким образом, образование NO в плазме определяется набором элементарных процессов, среди которых лимитированными являются такие, где происходит разрушение крепких связей молекулы N<sub>2</sub>. Элементарная реакция синтеза NO при участии колебательно-возбужденных молекул азота лимитируется элементарным процессом  $O(^3P) + N_2(^1\Sigma_g^+, v) \rightarrow NO(^2\pi) + N(^4S)$ . Приведенная реакция может происходить как прямым адиабатическим так и неадиабатическим путем. Последний путь синтеза может происходить через образование промежуточного колебательно-возбужденного комплекса  $NO_2(^1\Sigma_g^+)$ :



Крайнее значение энергетической эффективности образования NO в неуравновешенных разрядах не превышает 35%.

Вторая стадия – разрушение промежуточного комплекса  $NO_2(^1\Sigma_g^+)$  – описывается закономерностями статистической теории. В рамках классического приближения Маркуса–Райса с учетом поправок на ангармонизм, вероятность разрушения связи будет зависеть от колебательной, поступательной и вращательной энергии [4].

В условиях неуравновешенной плазмы при температурах до 1000<sup>0</sup>К может преимущественно происходить механизм (1) элементарного процесса, который принципиально отличается от такового в уравновешенных условиях и характеризуется диссоциацией молекул азота под воздействием поля точечного заряда (иона) на химические связи.

Эффективным техническим решением в области снижения интенсивности дугообразования при коммутации активно-индуктивной нагрузки явилось изменение конструкции силовых контактных соединений, позволившее реализовать одновременное размыкание полюса (фазы) в нескольких точках, разделив одну мощную дугу на ряд дуг меньшей мощности и приблизив их к герметичным дугогасительным камерам. Это нашло своё отражение в конструкциях специальных прямоходных контакторов серий КТУ; КРМ и т.п. для рудничных взрывозащищённых пускателей [5].

При сравнении результатов испытаний, рис.1, контакторов с герметичными – КТУ (кривая 2) и негерметичными – КТ 6000 (кривая 1) и КТ 7000 (кривая 3-4) дугогасительными камерами, установлено, что при одинаковых параметрах нагрузки контакторы КТУ создавали почти в три раза меньшую концентрацию окислов азота, чем общепромышленные контакторы серии КТ. Приведенные зависимости для различных контакторов свидетельствуют о значительном влиянии на концентрацию продуктов дугогашения мощности присоединенной нагрузки, частоты коммутаций и типа системы дугогашения.

Исследованиями УкрНИИВЭ установлено, что более 90% окислов азота выделяется при отключении активно-индуктивной нагрузки. Выделяемое количество окислов азота пропорционально энергии дуги при постоянном коэффициенте мощности асинхронного двигателя, поэтому при его изменении меняется и коэффициент пропорциональности между энергией электрической дуги и количеством выделяемых окислов азота (рис.2). Зависимость коэффициента пропорциональности между этими величинами от коэффициента мощности электрической нагрузки приведена на рис.3.

Полученные зависимости показывают, что для рудничных пускателей (с прямоходными контакторами) при коэффициенте мощности 0,35...0,60 (что соответствует начальному периоду пуска АД), коэффициент пропорциональности между количеством выделенных окислов азота и энергией электрической дуги составляет (7,5...8) 10<sup>-9</sup> г/Дж.

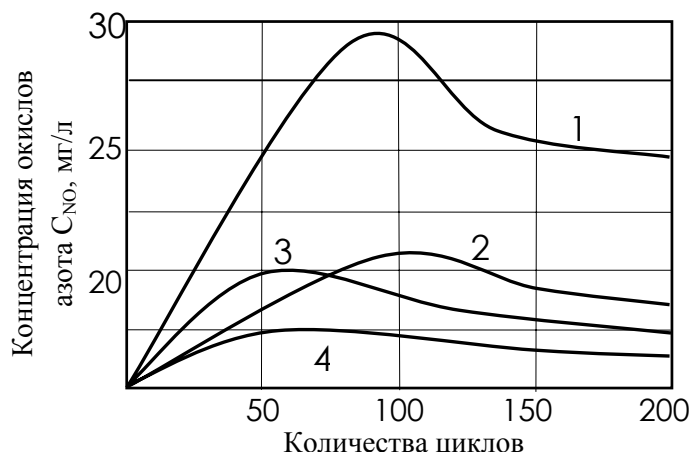


Рисунок 1 – Концентрация окислов азота в функции количества наработанных циклов В-В для рудничных пускателей ПВИ-320 (контактор КТ6043АР; кривая 1), ПВИ-250 (контактор КТУ-4; кривая 2) и для пускателя ПВИ-125 (контактор КТ7123У) при частоте 600 і 300 циклов ВВ в час (соответственно кривые 3 и 4)

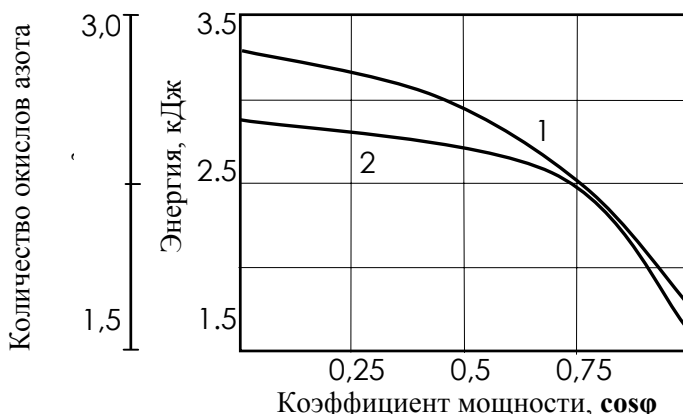


Рисунок 2 – Энергия (кривая 1) и количество выделяемых окислов азота (кривая 2) в функции коэффициента мощности

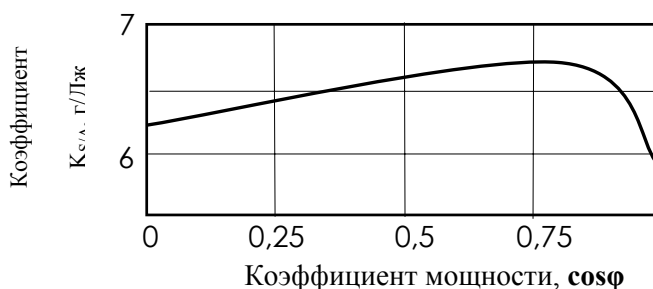


Рисунок 3 – Коэффициент пропорциональности между энергией и количеством выделяемых окислов азота  $K_{S/A} = S/A$  (г/Дж) в функции коэффициента мощности нагрузки

Кроме этого, установлено существенное влияние физико-химического состояния микроатмосферы внутри взрывозащищенной оболочки пускателя на состояние контактных соединений. Под действием агрессивной среды наблюдается увеличение их электрического сопротивления, а в некоторых случаях и полная потеря контакта. Визуальный осмотр и оценка состояния контактных поверхностей после испытаний показали, что поверхность контактов является неоднородной как по цвету, так и по характеру и виду скоплений продуктов коррозии (рис.4).



Рисунок 4 – Характерный вид поверхности контактов после испытаний;  $\times 30$   
(фото получено сотрудниками УкрНИИВЭ)

В частности, установлено, что на протяжении 7,5 месяцев воздействия коррозии, которая содержит окислы азота, на поверхности контактов штепсельных разъемов из латуни образовались не электропроводные пленки в виде окислов и азотнокислых солей металлов. Окисленная пленка на поверхности контактов с покрытием никеля, олово-никеля обуславливала повышение сопротивления контактного соединения до 10 Ом включительно. Поэтому, в случае применения контактной группы с четырьмя контактными площадками существует вероятность величины сопротивления контактного соединения в фазе в пределах  $0 \div 2,5$  Ом на фазу. Это может привести к снижению чувствительности устройств максимальной токовой защиты пускателя, что в случае возникновения двухфазного короткого замыкания на отдаленном участке кабельной сети не даст возможности выявить аварийный процесс и с достаточным быстродействием произвести автоматическое отключение напряжения питания.

Для описания зависимости переходного сопротивления от количества наработанных циклов была принята логарифмическая функция, где для аппроксимации полученных результатов использовалась зависимость:

$$Y = a + b_0 \cdot \exp(b_1 X) \quad (2)$$

где  $Y$  – переходное сопротивление контактов, мОм;  $X$  – количество наработанных циклов ВВ;  $a, b_0, b_1$  – коэффициент регрессии.

Таким образом, при рассмотрении коммутационных процессов в установках электротехнического комплекса участка шахты следует исходить из тенденции применения прямоходных контакторов с повышенным количеством контактных площадок в фазе и высокой вероятности неодинакового технического состояния поверхности каждой такой контактной площадки. Поэтому процесс горения дуги следует считать стохастическим, в котором применительно к трехфазной контактной группе при наличии нескольких контактных площадок в каждой фазе возможны различные комбинации проводящих состояний. Количество таких комбинаций определяется количеством общих комбинаций контактных соединений за вычетом комбинаций, при которых протекание тока в цепи нагрузки – невозможно (комбинации соединения в контактных площадках только одной фазы):



$$K = m^n - k \quad (3)$$

где  $m$  – возможные состояния контактных площадок (замкнуто-разомкнуто);  $n$  – общее количество контактных площадок всех контактных групп;  $k$  – количество невозможных комбинаций.

В частности, применительно к прямоходному контактору серии КТУ с переключаемыми общим контактом двумя контактными площадками на каждом вводе и каждом выводе фазы (в предположении, что токопроводящее состояние вводных контактов

каждой фазы сохраняется на некотором интервале коммутационного процесса) указанные проводящие комбинации в течение этого интервала иллюстрируются рис. 5.



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
A	1																											
	2																											
B	1																											
	2																											
C	1																											
	2																											
		28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
A	1																											
	2																											
B	1																											
	2																											
C	1																											
	2																											

Рисунок 5 – Возможные комбинации горения электрической дуги в трехфазной контактной группе при наличии двух контактных площадок:  – замкнутое состояние контактной площадки;  – разомкнутое состояние контактной площадки

В каждой контактной площадке, в свою очередь, может иметь место: металлическое соединение либо дугообразование, которому соответствует дуга либо металлическое замыкание между размыкающими контактами любой из контактных площадок другой фазы; возможный разомкнутый вариант (кратковременное гашение дуги).

С учетом этих возможных состояний контактных площадок выводных контактов (в предположении проводящего состояния вводных) комбинация 29 (рис.5) будет выглядеть следующим образом (рис.6):

фаза А									
площадка 1									
фаза В									
площадка 1									
фаза В									
площадка 2									

Рисунок 6 – Возможные состояния контактных площадок 31 комбинации горения электрической дуги в трехфазной контактной группе:  – металлическое замыкание контактной площадки;  – дуговое замыкание контактной площадки

**Выводы.**

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что дугообразование, которым сопровождается контактное отключение асинхронного двигателя, создаёт в закрытой взрывонепроницаемой оболочке шахтного пускателя условия образования азотных и азотистых кислотных соединений, которые существенно снижают ресурс изоляционных материалов, качество поверхности контактных площадок. Этим обусловлена рациональность применения прямоходовых контакторов шахтных пускателей, отличающихся увеличением количества контактных площадок в каждой фазе, обеспечивающих снижение интенсивности дугообразований при контакторной коммутации силовой цепи и увеличение интенсивности дугогашения. В связи с этим, при моделировании коммутационных переходных процессов в электротехническом комплексе участка шахты дугообразование при коммутации каждой фазы следует учитывать как стохастический

процесс, отличающийся множественностью комбинаций проводящих состояний.

Выявленные электрохимические процессы при контакторной коммутации силовой цепи в пускателе обуславливают тенденцию к повышению активного сопротивления в его силовой контактной группе. Поэтому при исследовании процессов в электротехническом комплексе технологического участка шахты рационально учитывать вероятность не реагирования максимальной токовой защиты силового коммутационного аппарата на короткое замыкание в удалённой точке отходящего присоединения в связи с возможным повышением сопротивления в контактной группе контактора пускателя.

### Литература

1. Березина Г.П. Импульсная плазмохимия  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ . Прикладная физика / Березина Г.П., Онищенко И.Н., Ус В.С. – 2002. – №2. – С. 34–44.
2. Теоретическая и прикладная плазмохимия / Л.С. Полак, А.А. Овсянников, Д.И. Словецкий, Ф.Б. Вурзель. – М.: Наука, 1975. – 304 с.
3. Соболев В.В. Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда / Доп. НАН України. – 2010. – №4. – С. 88–95.
4. Русанов В.Д. Синтез окислов азота в неравновесных плазменных системах // Химия плазмы. Вып. 5 / Русанов В.Д., Фридман А.А., Шолин Г.В.; под ред. Б.М. Смирнова. – М.: Атомиздат, 1978. – С. 222-241.
5. Дзюбан В.С. Справочник энергетика угольной шахты / Дзюбан В.С., Риман Я.С., Маслий А.К. – М.: Недра, 1983. – 542 с.

### Abstract

*Kovalyova I.V., Sobolev V.V. Analysis of influence factors at electrical arc in the context of modeling of interconnect transients in the electrotechnical complex of main section. The electrochemical processes during commutation of power circuit with stock-taking electric arc in the microclimate of the explosion-proof shell are investigated and analyzed. The factors of influence at electrical arc for modeling of interconnect transients in the electrotechnical complex of main section are based.*

**Keywords:** *electrical arc, plasma, unstable system, contactor, commutation.*

### Анотація

*Ковальова І.В., Соболев В.В. Аналіз факторів впливу при дугоутворенні в контексті моделювання комутаційних перехідних процесів у силовому ланцюзі електротехнічного комплексу дільниці шахти. Досліджені та проаналізовані електрохімічні процеси при контакторній комутації силового ланцюга з урахуванням дугоутворення в мікрокліматі вибухозахищеної оболонки. Обґрунтовані діючі фактори при дугоутворенні для моделювання комутаційних перехідних процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти.*

**Ключові слова:** *електрична дуга, плазма, невірноважена система, азотисті сполуки, контактор, комутація.*

Здано в редакцію:  
15.05.2010р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Сивокобиленко В.Ф.