#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Benmouyal G., Schweitzer E.O., Guzman A. Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control, and Analysis of Electric Power Systems // Proc. 29th Annual Western Protective Relay Conference, Oct. 2002. – Spokane, USA, 2002.
- Phadke G. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control // Proc. IEEE Trans. on Power Delivery, January. – 1994. – V. 9. – № 1. – P. 442–452.
- Phadke A.G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems // Proc. IEEE Trans. on Computer Applications in Power, April. – 1993. – V. 6. – № 2. – P. 10–15.
- Morison K., Wang L., Kundur P. Power System Security Assessment // IEEE Power&Energy Magazine, September/October. – 2004. – V. 2. – № 5. – P. 30–39.
- Xiao J., Xie X., Li H. et al. Power System Dynamic Security Assessment via Synchrophasor Monitoring // Proc. International Conf. on Power System Technology POWERCON. – Nov. 2004. – Singapore, 2004.
- Taylor C.W., Erickson D.C., Martin K.E. WACS Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration // IEEE. – 2005. – V. 93. – № 5.

- Taylor C.W., Erickson D.C., Wilson R.E. Reducing Blackout Risk by a Wide-Area Control System (WACS): Adding a new Layer of Defense // Proc. 2005 Power System Computation Conf.
- Ernst D., Pavella M. Closed-Loop Transient Stability Emergency Control // IEEE Power Engineering Society. – 2000. – Winter Meeting.
- Zima M., Andersson G. Stability Assessment and Emergency Control Method Using Trajectory Sensitivities // Proc. IEEE Bologna Power Tech 2003 Conf. – June. – Bologna, 2003.
- Аюев Б.И., Ерохин П.М., Куликов Ю.А. Система мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС // Технологии управления режимами энергосистем XXI века: Сб. докл. Всеросс. научнопракт. конф. / Под ред. А.Г. Фишова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 83–92.
- SEL-421. High-Speed Line Protection, Automation, and Control System [Электронный ресурс]: Официальный сайт Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. – режим доступа: http://www.selinc.com/sel-421.htm. – 07.09.2009.

Поступила 07.09.2009 г.

УДК 53.01

# УСЛОВИЯ ПОГАСАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ВОЗДУХЕ

# М.В. Лавринович

Томский политехнический университет E-mail: lavr@elti.tpu.ru

Исследовано влияние условий погасания электрической дуги в воздухе с целью применения найденных характеристик в расчетных моделях перемежающихся дуг в сетях с изолированной нейтралью. Найдено, что амплитуда последней полуволны тока, при котором дуга еще горит, не зависит от неоднородности поля между электродами. Экспериментально определена зависимость амплитуды полуволны отключаемого тока от частоты колебаний тока. В воздухе, также как и вакууме (давление менее 10<sup>-3</sup> Па), наблюдается явление среза тока, которое возникает при подходе тока к нулевому значению. В случае неуспешного погасания электрической дуги бестоковая пауза может изменяться в достаточно широких пределах и достигать значений вплоть до 1 мс.

#### Ключевые слова:

Электрическая дуга, изолированная нейтраль, перенапряжения, срез тока.

### Key words:

*Electric arc, insulated neutral, overvoltage, current break.* 

#### 1. Введение

Вопрос заземления нейтрали трехфазной электрической сети в литературе поднимается с 1934 г. [1]. В настоящее время эта тема проработана достаточно основательно, поэтому можно с уверенностью сказать, что известны все варианты работы сети с заземленной нейтралью и последствия однофазных замыканий на землю [2]. Для сетей с изолированной нейтралью одной из проблем остается появление перемежающих электрических дуг, которые приводят к значительным перенапряжениям и выводу из строя оборудования. Этот процесс носит стохастический характер, что затрудняет его изучение и моделирование. Для создания правильной расчетной модели процесса зажигания и погасания электрической дуги необходимы экспериментальные данные. Известно значительное количество материалов по зажиганию электрической дуги в воздухе или вдоль поверхности диэлектрических элементов, например [3, 4]. Вопросам погасания электрической дуги в воздухе уделено меньшее внимание. В частности, отсутствуют данные по параметрам погасания электрической дуги в воздухе в зависимости от степени неоднородности электрического поля, частоты колебаний тока электрической дуги и других факторов, присутствующих в реальных условиях. Для правильного определения возникающих перенапряжений в случае возникновения перемежающихся электрических дуг необходимо знать и учитывать эти зависимости. Существует несколько теорий, описывающих перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью при перемежающихся дуговых замыканиях на землю [5]. Неплохое приближение к наблюдаемым на практике результатам, с точки зрения максимальных значений перенапряжений, дают теории Петерсена, Петерса и Слепяна, Белякова [6]. Значения перенапряжений, рассчитанные по этим теориям, связаны с различными допущениями, положенными в основу теории процесса зажигания и погасания электрической дуги.

Характерной особенностью теории Петерсена [5] является предположение о том, что после каждого зажигания электрическая дуга гаснет при первом прохождении суммарного тока замыкания через ноль, а каждый последующий пробой изоляции происходит с интервалом в половину периода промышленной частоты на максимуме напряжения поврежденной фазы.

Согласно теории Петерсена и Слепяна [5] после зажигания электрическая дуга гаснет при первом прохождении через ноль принужденной составляющей тока замыкания. Все остальные допущения остаются такими же, как и в теории Петерсена.

В теории Белякова [6] сделано предположение, что электрическая дуга после зажигания может погаснуть как при первом прохождении тока через ноль, так и при любом последующем переходе через ноль свободной составляющей тока замыкания.

Каждая из приведенных теорий, *во-первых*, опирается на предположения, а не на экспериментальные данные, подтверждающие эти предположения. *Во-вторых*, все теории содержат предположение о том, что при зажигании электрической дуги возникают переходные процессы с частотами колебаний тока более 50 Гц. В [5] приводятся данные, что колебания токов переходного процесса лежат в диапазоне 50...2000 Гц, но условий погасания электрической дуги при частотах более 50 Гц в литературе не встречается.

Современные вычислительные средства позволяют при математическом моделировании электрической перемежающейся дуги учитывать значения токов, при которых происходит гашение тока электрической дуги в зависимости от его частоты. Нами была поставлена цель — экспериментальным путем исследовать важные характеристики процессов погасания электрической дуги в воздухе: зависимости величины тока погасания электрической дуги от формы электродов, между которыми зажигается и гаснет электрическая дуга, и частоты тока в диапазоне характерном для перемежающихся дуг [5] вплоть до 4,5 кГц.

### 2. Методика эксперимента

Исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Конденсаторная батарея С собрана на основе конденсаторов типа ИК-100-0,4, количество конденсаторов можно было изменять от 1 до 14 шт., это необходимо для изменения частоты колебаний тока. Емкость одного конденсатора по результатам измерения, составляла 0,47 мкФ. Конденсаторная батарея заряжалась от высоковольтного трансформатора T за время 30...40 с. Напряжение, на выходе трансформатора можно было регулировать в диапазоне 0...90 кВ. Напряжение заряда конденсаторной батареи регистрировалось с помощью электростатического киловольтметра PV типа С197. Исследуемый искровой промежуток FV создан двумя электродами, расстояние между которыми можно было регулировать в диапазоне 1...20 мм с погрешностью  $\pm 0,2$  мм.

Для изменения формы электрического поля в рабочем промежутке использовали электроды шар — шар (диаметр шара 50 мм, материал шара Ст. 3), стержень – шар (диаметр стержня 1 мм, диаметр шара 50 мм) и изменялось межэлектродное расстояние от 5 до 10 мм и от 20 до 30 мм, соответственно (см. таблицу). Такая форма электродов позволяет создавать между ними электрическое поле от слабонеоднородного до резконеоднородного. Напряжение на исследуемом искровом промежутке FV поднималось до его самопробоя, при этом конденсаторная батарея разряжалась через FV на катушку индуктивности L. В колебательном контуре, образованном конденсаторной батареей С и индуктивностью L, возникали затухающие колебания с собственной частотой  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  (декремент затухания



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: SA – контактор, AT – регулировочный автотрансформатор; T – высоковольтный трансформатор типа TB-110; VD – выпрямитель (высоковольтный вентиль); R – защитное сопротивление; C – конденсаторная батарея; PV – вольтметр; FV – исследуемый искровой промежуток; L – индуктивность, R<sub>ш</sub> – сопротивление для измерения тока; R<sub>д</sub> и R<sub>д</sub> – сопротивления высоковольтного и низковольтного плеча делителя напряжения

изменяется в пределах от 0,7 до 0,75; количество колебаний до прекращения тока дуги составляло 14—16 периодов), ток фиксировался на осциллографе типа *Tektronix TDS 3032 В* с помощью сопротивления  $R_{\rm III}$ , конструкция которого описана в [7]. Напряжение на индуктивности регистрировалось с помощью резистивного делителя напряжения, изготовленного на базе резисторов типа TBO-60 –  $R_{\rm AII}$ высоковольтное плечо (4 резистора по 20 кОм, включенных последовательно-параллельно, общее сопротивление высоковольтного плеча 20 кОм) и TBO-2 –  $R_{\rm AI2}$  низковольтное плечо (5 резисторов по 20 Ом, включенных параллельно.) По результатам калибровки сопротивление  $R_{\rm III}$  – 0,012 мОм, коэффициент деления делителя напряжения – 1436.

# 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Типичная осциллограмма тока, протекающего в разрядном контуре, приведена на рис. 2. Постепенное затухание тока позволяет плавно достичь такого значения, при котором происходит прекращение тока электрической дуги при переходе его через ноль. Осциллограмма этого явления приведена на рис. 3. Так как процесс прекращения тока при переходе через ноль носит стохастический характер, то прекращение тока электрической дуги наблюдается как при положительном последнем перед погасанием полупериоде тока, так и при отрицательном.



**Рис. 2.** Типичные осциллограммы: верхняя – ток в разрядном контуре; нижняя – напряжение на индуктивности

Из рис. 3 видно, что наблюдаются броски тока при подходе его к нулю. По-видимому, эти броски тока вызваны обрывом тока при некотором его значении близком к нулю. Подтверждение этому – броски напряжения (перенапряжение) на индуктивности, наблюдаемые на осциллограмме напряжения. Это явление применительно к вакуумным электрическим дугам в литературе получило название «срез тока» [8]. Таким образом, и в газе существует пороговое значение тока для устойчивого горения электрической дуги. Это подтверждает осциллограмма на рис. 2, видно, что при каждом переходе тока через ноль видны броски на осциллограмме тока. Их происхождение можно объяснить тем, что при подходе тока к нулю складываются условия для его среза. После среза тока возникающее перенапряжение вызывает пробой воздушного промежутка, в котором еще остаются продукты горения электрической дуги, и дуга загорается вновь. Попытки среза тока в наших экспериментах наблюдались при значениях амплитуды предшествующей полуволны тока вплоть до 21 А при частоте колебаний тока 325 Гц и 46 А – при частоте 1250 Гц.



**Рис. 3.** Осциллограммы при погасании тока: верхняя – ток в разрядном контуре, нижняя – напряжение на индуктивности

Из-за многочисленных факторов, влияющих на условия погасания электрической дуги, бестоковая пауза может изменяться в довольно широких пределах. В экспериментах была зафиксирована пауза длительностью более 1 мс, рис. 4. Так как это явление носит случайный характер, в моделях описания электрических перемежающихся дуг необходимо учитывать это обстоятельство.



**2ис. 4.** Осциллограммы, подтверждающие возможность пробоя промежутка при длительности бестоковой паузы более 1 мс

Экспериментальные данные о влиянии неоднородности электрического поля в межэлектродном промежутке на характеристики погасания в нем электрической дуги приведены в таблице. При постоянных параметрах схемы (период собственных колебаний тока  $T_{c_B}$  постоянен, изменяется конфигурация поля за счет изменения формы электродов и расстояния между электродами) амплитуда последней полуволны тока *I*, после которого электрическая дуга погасает, не зависит от неоднородности поля между электродами (формы и расстояния между электродами *S*). Следовательно, этот фактор слабо влияет на погасание электрической дуги в воздухе.

Таблица.	Экспериментальные характеристики разряда при
	варьировании расстояния между электродами

<i>Т</i> <sub>св</sub> , мс	Электроды	<i>S</i> ±0,2, мм	/±20 %, A
	Шар – шар	5	5,7
1,52		9	5,6
		10	5,2
	Шар – шар	3	5,8
1,35		5	5,7
		8	5,7
3 10	Острие – шар	20	2,7
5,10		30	2,6

Результаты влияния частоты колебаний тока на амплитуду последней полуволны тока, после которого электрическая дуга в воздухе погасает, приведены на рис. 5.

Ход зависимости, приведенной на рис. 5, можно объяснить различными конкурирующими условиями, возникающими в промежутке при горении электрической дуги. При относительно низких частотах ток разогревает электроды и газ, в котором горит электрическая дуга, до таких значений, что при изменении направления тока облегчены условия перехода катодного пятна с одного электрода на другой. Повышение частоты ухудшает эти условия: при переходе катодного пятна с одного электрода на другой требуется больший ток для образования условий зажигания электрической дуги на другом электроде. Дальнейшее повышение частоты приводит к отставанию деионизации газа в электрической дуге, что способствует облегчению зажигания электрической дуги с током в противоположном направлении. Такой характер поведения электрической дуги от частоты колебаний тока дуги следует использовать при расчетах переходных процессов при замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью вместо условий, предлагаемых теориями Петерсена, Петерса и Слепяна, Белякова [6].

# Выводы

- Изучены условия погасания электрической дуги в воздухе между электродами разной конфигурации при частотах собственных колебаний тока дуги в диапазоне 0,3...4,5 кГц.
- Показано, что амплитуда последней полуволны тока, после которого электрическая дуга погасает, в диапазоне токов 2...50 А не зависит от неоднородности поля между электродами. При этом нет корреляции между направлением протекания тока и амплитудой последнего полупериода отключаемого тока.
- Установлено, что частотная зависимость амплитуды полуволны тока, после которого электрическая дуга гаснет, носит нелинейный характер, что следует учитывать при моделировании электрической перемежающейся дуги, т. к. от значения тока дуги зависит коэффициент перенапряжений в отключаемой сети; появление



**Рис. 5.** Зависимость амплитуды полуволны тока, после которого электрическая дуга в воздухе погасает, от частоты колебания тока

электрических перемежающихся дуг с токами замыкания более 10 А маловероятно.

 Обнаружено, что в воздухе, как и при давлении остаточного газа менее 10<sup>-3</sup> Па, происходит срез

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Черногубовский З.П. Заземление нейтрали электрических систем высокого напряжения. – Л.: Кубуч, 1934. – 202 с.
- Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
- Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах / Пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 564 с.
- Лозаннский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. – 275 с.
- Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

тока, который возникает при подходе тока к нулевому значению. Срез тока вызывает перенапряжение, способствующее повторному пробою и горению электрической дуги.

- Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 12–14.
- Азаркевич Е.И., Котов Ю.А. Шунт из композиционных резисторов // Приборы и техника эксперимента. 1976. № 6. С. 119–120.
- Вакуумные дуги. Теория и приложение / Пер. с англ. под ред. В.С. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 362 с.

Поступила 14.10.2009 г.

УДК 621.34+661.879

# ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ЗАГРУЗКИ ПЛАМЕННОГО РЕАКТОРА

### С.В. Бойко, С.Н. Кладиев

### Северская государственная технологическая академия, г. Северск E-mail: kladiev@ssti.ru

Проведен расчет безотказной работы шнека загрузки пламенного реактора в составе технологического оборудования фторирования урана. На базе частотного преобразователя с повышенной надежностью модернизирован электропривод шнека загрузки. Предложена схема технологического контроля и управления пламенным реактором от АСУ ТП. Предусмотрена возможность дистанционного задания регулируемой частоты вращения электропривода шнека, реверса, вывода числовой и графической информации параметров системы управления на ПЭВМ оператора.

#### Ключевые слова:

Переработка оксидов урана, фторирование урана, пламенный реактор, шнек загрузки, мотор-редуктор, частотно-регулируемый электропривод, надежность электротехнического оборудования.

#### Key words:

Uranium oxide processing, uranium fluorination, flame reactor, load screw, motor reducer, variable-frequency electric drive, electro technical equipment reliability.

#### Введение

Одним из основных путей утилизации высокообогащённого урана является использование его в качестве топлива в энергетических ядерных реакторах для производства тепловой и электрической энергии. Большинство энергетических ядерных реакторов используют низкообогащенный уран.

# Постановка задачи

С целью повышения функциональной надежности пламенного реактора, основного аппарата в технологическом процессе фторирования оксидов урана, необходимо одновременно контролировать частоту вращения шнека загрузки и момент нагрузки на его валу. Только наличие момента нагрузки на валу шнека при косвенном дозировании по его оборотам может гарантироввать подачу порошка оксидов урана в пламенный реактор для последующего фторирования. Данная задача должна быть решена при помощи современного частотно-регулируемого электропривода, интегрированного в существующую АСУ ТП.

# Расчет надежности технологического оборудования

В атомной промышленности на первый план выходят принципы безопасности ядерного производства и ядерных технологий, надежности техно-