

УДК 621.316

**АЗЕРБАЙДЖАНСКИЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ
НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ**

АХУНДОВ С.А. *, ИМАНОВ С.В., ЛАЗИМОВ Т.М.

*Siemens AG**

Азербайджанский Технический Университет

Обобщен опыт исследований влияния характеристик высоковольтных выключателей на коммутационные процессы, ведущихся в Азербайджане с 2000 года. Приведены основные результаты проведенных исследований и сформулированы возможные направления их развития.

Впервые необходимость в исследовании влияния характеристик высоковольтных выключателей на коммутационные процессы и перенапряжения стала актуальной для Азербайджана с конца 90-х годов прошлого века в связи начавшейся заменой силовых выключателей старого поколения (масляные и воздушные) на вакуумные и автокомпрессионные (элегазовые) выключатели западного производства. Отметим, что к этому времени доля вакуумных и автокомпрессионных выключателей составила уже более 85% мирового производства [1]. Однако, на всем постсоветском пространстве имевшийся опыт эксплуатации силового коммутационного оборудования относился к выключателям старого поколения, а небольшой опыт эксплуатации вакуумных выключателей советского производства был негативным. Это было связано как с объективными (низкое качество изоляции сетей среднего напряжения [1]), так и субъективными (высокие значения токов среза вакуумных дугогасительных камер советского производства, достигавшие 35 А [2]) причинами. Кроме того, определенную роль в создании негативного имиджа вакуумных и элегазовых выключателей играли в 90-х годах XX-го века российские производители, выпускающие выключатели старого поколения [3] и не желающие терять своих позиций на постсоветском рынке.

Исследование влияния характеристик выключателей на коммутационные процессы началось в 2000-м году. С 2001-го по 2005-й год в Азербайджанском НИИ Энергетики и Энергетического Проектирования по договору с ОАО Азерэнерджи был выполнен ряд исследовательских работ, которые, уже в рамках государственного бюджета, продолжают в настоящее время в Азербайджанском Техническом Университете.

В рамках проводившихся исследований были получены следующие основные результаты:

1. были выявлены дифференциальные характеристики выключателей, отражающие основные физические особенности процесса отключения и позволяющие учитывать в численных моделях их электрические и механические характеристики [4];
2. разработана численная модель процесса среза тока при его приближении к нулевому значению. Получены соотношения между начальным шагом расчёта, током среза выключателя, амплитудой отключаемого тока и собственной частотой цепи отключения для различных диапазонов собственных частот. На основании модели процесса среза разработаны логические условия отключения выключателя при численной реализации [5];

3. предложен косинусоидальный закон восстановления электрической прочности высоковольтного выключателя, отражающий инерцию подвижного контакта [6] и хорошо согласующийся с [7]. Показано, что этот закон даёт более адекватную симуляцию процесса отключения по сравнению с прямолинейным законом восстановления, используемым в [8]. Показано также, что использование косинусоидального закона наиболее целесообразно для автокомпрессионных (элегазовых) выключателей. Установлено, что модели с постоянной скоростью восстановления электрической прочности завышают расчетные кратности перенапряжений при отключении емкостных токов вакуумными выключателями. В тоже время занижаются расчетные вероятности возникновения хотя-бы одного повторного зажигания при отключении емкостных токов автокомпрессионными и вакуумными выключателями [4,6];

4. серийные расчеты процессов отключения емкостных токов (силовых конденсаторных батарей) и малых индуктивных токов (ненагруженных трансформаторов и автотрансформаторов) на ступенях 110-220 кВ показали, что кратности перенапряжений при использовании всех типов выключателей не превышают трехкратного значения. Вместе с тем, кратности восстанавливающихся между контактами выключателей напряжений могут быть выше четырех. При этом наименьшие вероятности возникновения повторных зажиганий имеют место для вакуумных выключателей (не более 17%) [4]. Показано также, что в ряде случаев выключатели с большими токами среза могут давать меньшие перенапряжения при отключениях индуктивностей и дана физическая интерпретация этого факта [9];

5. проанализирована отключающая способность высоковольтных выключателей по частоте, описанная в [10], и показано, что предельные частоты для вакуумных выключателей составляют $3,13 \div 15,9$ кГц в диапазоне амплитуд отключаемых токов $2500 \div 500$ А [5]. В [11] нами установлено, что скорости изменения высокочастотного тока в переходном процессе отключения типовых конденсаторных батарей значительно ниже предельных значений, препятствующих успешному гашению дуги;

6. проанализирован процесс включения мощной конденсаторной батареи к источнику напряжения, получены соотношения для оценки кратностей токов включения. Показано, что при включениях конденсаторных батарей (и повторных включениях при коммутации отключения) возникают токи в несколько килоампер, что представляет опасность для вторичных цепей распределительных устройств [12], особенно, для расположенных в чувствительных электромагнитных средах [13];

7. установлено, что использование автокомпрессионных и вакуумных выключателей приводит к снижению числа и вероятности возникновения повторных зажиганий дуги при отключении конденсаторных батарей [12]. В тоже время, эти выключатели могут приводить к повышению математического ожидания тока включения конденсаторных батарей;

8. предложены дополнительные критерии для выбора высоковольтных выключателей, удовлетворяющих стандартам по расчетным условиям стационарного режима и функционирования в аномальных режимах, в частности: а) координация уровня коммутационных перенапряжений с уровнем допустимых воздействий на изоляцию (при этом при выборе выключателей на обмотках среднего и низкого напряжения автотрансформатора следует иметь в виду возможность перехода волн перенапряжений на обмотки более высокого напряжения с более низкими относительными уровнями допустимых воздействий); б) координация уровня наведенных во вторичных цепях напряжений с допустимыми значениями продольных наведенных э.д.с. с целью улучшения электромагнитной совместимости [14, 15];

9. установлено, что наименьшие токи включения конденсаторных батарей имеет место в случаях, когда мощность батареи составляет примерно четверть номинальной полной мощности трансформатора (автотрансформатора) [16];

10. установлено, что неучёт сопротивления дуги отключения при численном исследовании процессов коммутации конденсаторной батареи может приводить к занижению расчетных кратностей перенапряжений до 3%, а также к завышению расчетных кратностей восстанавливающихся на контактах выключателя напряжений до 5% [17]. Следует, при этом, отметить, что возможно более точное моделирование восстанавливающихся напряжений имеет очень большое значение, т.к. именно посредством его пошагового сравнения с законом восстановления электрической прочности выключателя и задается фактическое (если оно должно иметь место) повторное зажигание в выключателе [18];

11. принятый закон восстановления электрической прочности выключателя при симуляции отключений ненагруженных ЛЭП может оказывать заметное влияние на кратности коммутационных перенапряжений. По нашим оценкам, различия в расчетных кратностях в зависимости от принятого закона восстановления (линейного или косинусоидального) может достигать 5% для напряжения на шинах линии и 4% – для напряжения между контактами выключателя [19]. Эти результаты получены для ЛЭП номинального напряжения 110-220 кВ различной длины;

12. учёт влияния дуги в межконтактных промежутках выключателей при симуляции отключения ненагруженных ЛЭП не оказывает сколь-нибудь существенного влияния на расчетные кратности перенапряжений и восстанавливающихся напряжений. Наши расчеты, проведенные для ЛЭП 110-220 кВ различной длины, показали, что различия в кратностях при учёте или неучёте активного сопротивления дуги не превышают $(1\div 2)\%$ [19]. Т.о., степень влияния сопротивления дуги на коммутационные перенапряжения при отключении конденсаторных батарей и ненагруженных ЛЭП (т.е. элементов емкостного характера) отлична;

13. уменьшение длины линии ведет к значительному снижению перенапряжений при её отключении. Например, последовательное уменьшение длины ЛЭП номинального напряжения 110 кВ со 100 до 50 км приводит, как показали проведенные нами численные эксперименты, к последовательному снижению перенапряжений на шинах линии. Расчетные перенапряжения для ЛЭП длиной 50 км составили 66% от перенапряжений для ЛЭП длиной 100 км. Зависимость перенапряжений от длины линии мы объясняем изменением фазового угла между отключаемым током и напряжением: т.к. емкостной ток пропорционален длине ЛЭП, то снижение длины (и тока) будет приводит к отключениям (обрывам дуги) при меньших мгновенных значениях напряжения [19];

14. показано, что характер изменения напряжения на отключаемой емкости (конденсаторной батарее или ненагруженной ЛЭП) принципиально отличается от даваемого в литературных источниках (см., например [20]): из-за влияния высокочастотной (свободной) составляющей напряжения нет никакой закономерности в изменении остающегося напряжения после первого и повторных гашений дуги и оно может изменяться совершенно случайным образом в определенных пределах [4, 18]. Следует отметить, что в классических источниках при стилизации процесса не учитывается влияние высокочастотных составляющих и остающееся напряжение кумулятивно нарастает [20];

15. оценены коэффициенты жесткости (stiffness factor) дифференциальных уравнений, описывающих функции напряжений и токов коммутационных режимов в электрических системах. Для повышения устойчивости решения систем дифференциальных уравнений предложен т.н. метод изменения схемы, при использовании которого удается понизить жесткость уравнений [21];

16. установлено, что при поиске оптимальных параметров численного эксперимента (компьютерной симуляции), обеспечивающих получение устойчивого решения системы дифференциальных уравнений, наиболее целесообразным является варьирование величины относительной погрешности, а не начального шага расчета. В результате

проведенных многочисленных симуляций процессов отключения емкостных и малых индуктивных токов установлено, что при использовании пакета программ MATLAB наиболее целесообразным вычислительным методом с точки зрения получения устойчивых решений является ode23tb (stiff/TR-BDF2) [22]. Отметим, что в исследованиях устойчивости решений дифференциальных уравнений, проведенных нами в [18, 21, 22], мы следовали основным положениям современной теории вопроса, изложенным в [23, 24].

На основании накопленного опыта и анализа состояния исследуемого вопроса по мировым источникам можно сформулировать ряд задач, представляющих значительных интерес с практической, научной и вычислительной точек зрения. Здесь мы укажем лишь некоторые из возможных направлений исследований, а именно:

- исследование и моделирование характеристик электрической прочности высоковольтных выключателей с нетрадиционными дугогасящими средами (смесь газов, азот и др.) с т.з. симуляции коммутационных процессов;
- исследование процесса отключения ненагруженного трехфазного стержневого трансформатора (автотрансформатора) современными выключателями и разработка соответствующих компьютерных моделей;
- разработка, усовершенствование и использование адаптивных численных методов, позволяющих изменять параметры расчета в зависимости от изменения физических параметров задачи (например, при отключении конденсаторной батареи помимо напряжения промышленной частоты на различных этапах процесса могут возникать свободные напряжения двух различающихся частот [22]);
- разработка методов и моделей, расширяющих возможности использования стандартных пакетов программ и др.

-
1. *Евдокунин Г.А., Тилер Г.* Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. Санкт-Петербург: Издательство Сизова М.П., 2002–148 с.
 2. *Тибилашвили Д.А.* Дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Государственный Технический Университет, 1991.
 3. *Белкин Г.С., Вариводов В.Н.* // Электричество - 2001 – № 9, с.24-29.
 4. *Ахундов С.А.* Дис. канд. техн. наук. Баку: Азербайджанский НИИ Энергетики и Энергопроект, 2002.
 5. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Проблемы Энергетики - 2000 – № 2, с.38-42.
 6. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Труды Международного Симпозиума SIEMA'2001. Харьков: Изд. НТУ "ХПИ", 2001, с.112-114.
 7. *Drebenstedt H., Rother W., Paul F., Schaller P.* // CIGRE 1986. Rep 13-02.
 8. *Евдокунин Г.А., Корепанов А.А.* // Электричество-1998 – № 4, с.2-14.
 9. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Ученые записки АзТУ-2002 – Том IX -№ 1, с.33-36.
 10. *Matsui Y., Yokoyama T., Umeya E.* // IEEE Transactions on Power Delivery – 1988 – Vol.3. № 4, p.1672-1677.
 11. *Lazimov T.M., Imanov S.V.* //Scientific Works of AzTU -2005 – № 2, p.48-50.
 12. *Ахундов С.А., Гаграманова С.В., Лазимов Т.М.* // Електротехніка і Електромеханіка-2002 – № 1, с.5-7.
 13. *Anders R., Campling A.C., Champiot G and oth.* // CIGRE 1980. Rep 36-05.
 14. *Lazimov T.M., Akhundov S.A.* // Proceedings of the Third International Conference – ELECO'2003, Bursa, Turkey, 2003, p.1-4.
 15. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Изв. Вузов и Энергообъединений СНГ. Энергетика - 2005 – № 5, с.47-51.
 16. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Ученые записки АзТУ-2000 – том IX - № 2, с.69-71.

17. *Hashimov A.M., Lazimov T.M., Imanov S.V.* // Power Engineering Problems -2007 – № 2, p.13-16.
18. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Проблемы энергетики - 2000 – № 3, с.60-64.
19. *Lazimov T.M., Imanov S.V.* // Proceedings of the Fifth International Conference – ELECO'2007, Bursa, Turkey, 2007, p.47-150.
20. Техника высоких напряжений. Под ред. *Д.В.Разевига*. М.: Энергия, 1975, 488 с.
21. *Лазимов Т.М., Ахундов С.А.* // Труды Республиканской Конференции по ИТ. Баку – 2003, т.1, с.221-223.
22. *Lazimov T.M., Imanov S.V.* // Proceedings of the International Symposium MEPS'06, Wroclaw, Poland, 2006, p.407-410.
23. *Shampine L.F.* Numerical Solution of Ordinary Differential Equations. New-York: Chapman and Hall, 1994.
24. *Sybillie G., Brunelle P., Le-Huy H., Dessaint L.A. and Al-Hadded K.* //IEEE Winter Meeting. Singapore 2000.

AZƏRBAYCANDA AÇARLARIN XARAKTERISTİKALARININ KOMMUTASIYA PROSESLƏRİNƏ TƏSİRİNİN TƏDQIQI TƏCRÜBƏSİ

AXUNDOV S.Ə., İMANOV S.V., LAZIMOV T.M.

Azərbaycanda 2000-ci ildən yüksək gərginlik açarlarının kommutasiya proseslərinə təsirinə dair tədqiqatların nəticələri təqdim olunmuşdur. Tədqiqatların bəzi mümkün inkişaf istiqamətləri göstərilmişdir.

AZERBAIJAN RESEARCH EXPERIENCE ON INFLUENCE OF CIRCUIT- BREAKERS CHARACTERISTICS ON SWITCHING PROCESSES

AKHUNDOV S.A., IMANOV S.V., LAZIMOV T.M.

The Azerbaijan research experience concerned to influence of high-voltage circuit-breakers on switching transients is presented. Some possible directions to develop the research are shown.