

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ХАРАКТЕРИСТИК
ВАКУУМНОЙ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ
ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Иванов А.В., Дегтярёв И.Л.

Работа посвящена экспериментальному исследованию и компьютерному моделированию процессов, происходящих в вакуумной дугогасительной камере при коммутации индуктивных токов. Экспериментальные исследования позволили выявить основные закономерности развития перенапряжений при характерных коммутациях, которые в некоторых случаях способны приводить к разрушению изоляции электродвигателей. На основе экспериментальных исследований были составлены математические модели исследуемых явлений и проведены компьютерные исследования перенапряжений, возникающих при различных коммутациях, как при отсутствии, так и при наличии мер защиты от них..

Введение

В последние годы мировая практика электроаппаратостроения ориентируется на направление, связанное с применением новых нетрадиционных видов изоляции для достижения компактности, лучших массогабаритных показателей и лучших эксплуатационных характеристик электрооборудования. В области создания коммутационных аппаратов наметилась четкая тенденция использования новых дугогасящих сред. Для электрических сетей напряжением 6-35 кВ в настоящее время доминирующими стали вакуумные выключатели (ВВ). Доля ВВ в общем количестве выпускаемых аппаратов в странах Европы и США достигает 70%, в Японии – 100%. В России в последние годы эта доля имеет постоянную тенденцию к росту и в настоящее время составляет около 50%.

Не исключением стало широкое использование ВВ 6-10 кВ в схемах управления электродвигателями (ЭД), в том числе и в схемах собственных нужд (СН) компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов, нефтеперекачивающих станций (НПС), газоперерабатывающих заводов (ГПЗ) и заводов, перерабатывающих попутный газ. Необходимость частых коммутаций некоторых групп электродвигателей на перечисленных объектах, обусловленная технологией производства, транспортировкой и переработкой газа, предопределяет использование именно вакуумной техники.

ВВ имеют ряд преимуществ перед традиционно применяемыми в средних классах напряжения масляными и электромагнитными выключателями: полная взрыво- и пожаробезопасность, экологическая чистота; большой коммутационный и механический ресурсы; компактность и быстродействие. Однако, наряду с перечисленными достоинствами, ВВ имеют и недостатки [1-3].

Их основным недостатком считается возможность генерирования перенапряжений при коммутациях индуктивных токов. За счет «жесткого» дугогашения (связанного с возможностью погасания дуги в момент перехода полного тока через нуль в переходном процессе, сопровождающем ее повторное зажигание) их использование в схемах СН КС и ГПЗ может стать причиной преждевременного старения изоляции присоединений с ЭД и даже полного ее разрушения.

В соответствии с современными представлениями, существуют следующие механизмы возникновения перенапряжений при коммутациях ВВ электрических машин:

- при срезе тока в вакуумной дугогасительной камере (ВДК), сопровождающем отключение развернувшегося двигателя;
- при повторных зажиганиях дуги и возникновении эскалации напряжения при отключении двигателя в пусковом режиме;
- при виртуальных срезах пусковых токов, сопровождающих процесс отключения неразвернувшегося двигателя;
- при множественных пробоях межконтактного промежутка при включении ЭД.

Изоляция вращающихся машин, с точки зрения электрической прочности является наиболее слабым элементом сети СН КС и ГПЗ. В процессе эксплуатации, вследствие ряда неблагоприятных воздействий, электрическая прочность этой изоляции существенно снижается. К неблагоприятным факторам, ускоряющим процесс старения изоляции, можно отнести частые и тяжелые пусковые режимы ЭД, их эксплуатацию в условиях загрязненной и увлажненной среды, повышенную вибрацию, перегревы и т.п.

Все эти факторы приводят к снижению первоначального уровня изоляции электродвигателей, появлению мест с ослабленной изоляцией, что существенно

повышает вероятность их повреждения при воздействии перенапряжений. В эксплуатации нередки случаи, когда после замены маломасляных или электромагнитных выключателей на вакуумные, повреждаемость статорных обмоток электродвигателей при их коммутациях возрастала.

Основная цель настоящей работы – экспериментальное и численное исследование электрофизических процессов в силовых вакуумных выключателях при коммутациях ЭД и разработка мероприятий по снижению перенапряжений до допустимого в условиях эксплуатации уровня.

Экспериментальное исследование процессов в ВДК

Осциллографирование электро-физических процессов, сопровождающих коммутации ВВ, проводилось в системах СН двух НПС. В качестве коммутационных аппаратов на присоединениях 10 кВ использовались ВВ типа ВБКЭ-10 с ВДК «*Siemens*» производства НПП «Элвест», г. Екатеринбург. Для защиты изоляции ЭД от перенапряжений использовались ограничители перенапряжений (ОПН) ЗАО «Феникс-88», г. Новосибирск.

Переходные процессы при коммутациях ЭД регистрировались девятиканальным электроннолучевым осциллографом с механической разверткой типа Н023. Измерительные входы осциллографа подключались коаксиальными кабелями к низковольтным плечам емкостных делителей напряжения (ДН), устанавливаемых в ячейках присоединений с двигателями рис.1.

В ходе экспериментов выяснилось, что вследствие электро-физических процессов в ВДК, опасные для статорной изоляции двигателя перенапряжения представляли опасность при двух характерных коммутациях: включении двигателя и отключении двигателя в пусковом режиме. Таким образом, целью дальнейших исследований явился компьютерный анализ переходных процессов, сопровождающих эти коммутации, как при отсутствии, так и при наличии специальных средств защиты.

На рис.2 приведена характерная осциллограмма процесса включения ЭД вакуумным выключателем (мощность ЭД 2000 кВт, длина кабеля 290 м).

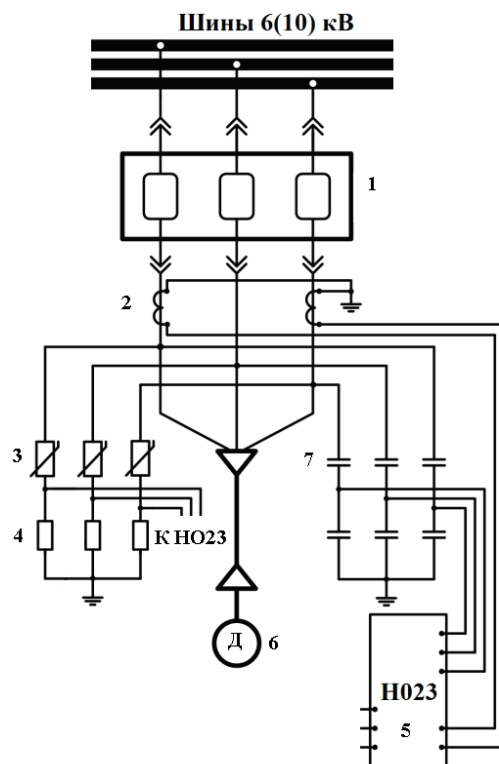


Рисунок 1. Принципиальная схема измерений

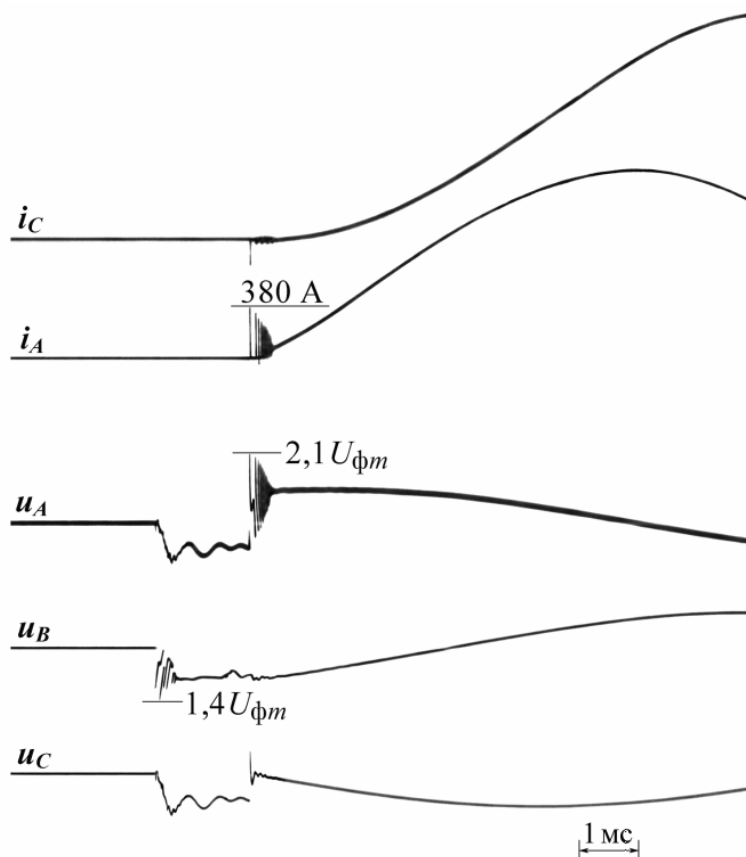


Рисунок 2. Включение ЭД вакуумным выключателем

Видно, что сближение контактов фаз *B* и *A* сопровождается повторными пробоями вакуумных промежутков, при которых кратность перенапряжений за выключателем присоединения на фазе *A* достигает $2,1U_{\phi m}$ (подключение фазы *C* происходит без перенапряжений).

Включение ЭД вакуумными выключателями во всех случаях происходило с повторными пробоями межконтактного промежутка и с возникновением высокочастотных перенапряжений. Эти перенапряжения представляют опасность главным образом для витковой изоляции электродвигателей.

Отключение неразвернувшегося двигателя в большинстве случаев происходило без повторных пробоев межконтактного промежутка и, соответственно, без опасных для изоляции ЭД перенапряжений. Тем не менее, в нескольких опытах была зафиксирована эскалация напряжений, при которой происходили многократные повторные зажигания дуги рис.3.

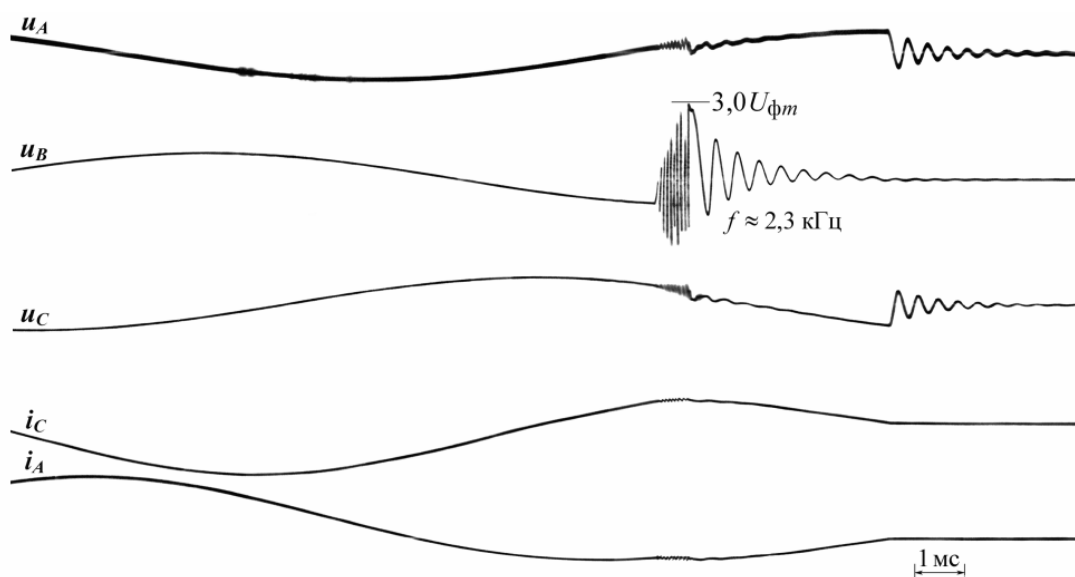


Рисунок 3. Эскалация напряжений при отключении неразвернувшегося ЭД 2000 кВт вакуумным выключателем ВБКЭ-10 (длина кабеля 550 м)

Видно, что примерно через 0,7 мс после возникновения повторных пробоев, перенапряжения достигли уровня, необходимого для срабатывания ОПН, что и прекращало эскалацию. После срабатывания ОПН и отключения первой фазы (фазы *B*) переходный процесс протекал с частотой свободных колебаний $\approx 2,3$ кГц.

Математическое моделирование процессов в ВДК

Исследование процессов в ВДК на персональной электронно-вычислительной машине (ПЭВМ) проводилось посредством составления математической модели исследуемой электрической сети, т.е. приведением дифференциальных уравнений токов и напряжений в узлах к форме Коши и составлением модели ВДК с экспериментальным определением параметров из полученных осциллограмм. Восстановление электрической прочности между расходящимися контактами полюса выключателя описывается выражением:

$$u_{\text{эл.пр.}} = k \cdot (t + t_0),$$

где t_0 – время между началом расхождения контактов выключателя и моментом прохождения тока промышленной частоты через нулевое значение, k – скорость восстановления электрической прочности, кВ/мс.

Исследования процессов включения ЭД ВВ позволили установить, что наиболее опасные для изоляции ЭД перенапряжения возникают при включении второй и третьей фазы ВВ, причем уровни перенапряжений, а также количество повторных пробоев существенно зависят от основных характеристик присоединения – длины кабеля, мощности ЭД и параметров ВДК. Выяснилось, что «наиболее неблагоприятными» являются присоединения с короткими длинами кабеля: при большой мощности двигателя наблюдается большое число повторных зажиганий дуги; при мощности ЭД менее 500 кВт повторные пробой сопровождаются высокими уровнями перенапряжений.

Расчеты показали также, что немаловажную роль в формировании повторных пробоев играет и сам выключатель. Разброс в действии отдельных полюсов, низкая скорость смыкания контактов, а также их дребезг могут способствовать длительному существованию повторных пробоев и возникновению высоких уровней перенапряжений.

На рис. 4 приведен фрагмент осциллограммы, полученной при экспериментальных исследованиях и соответствующие кривые, полученные при компьютерном моделировании. Хорошая сходимость подтверждает адекватность принятой математической модели реальным процессам, происходящим в ВДК.

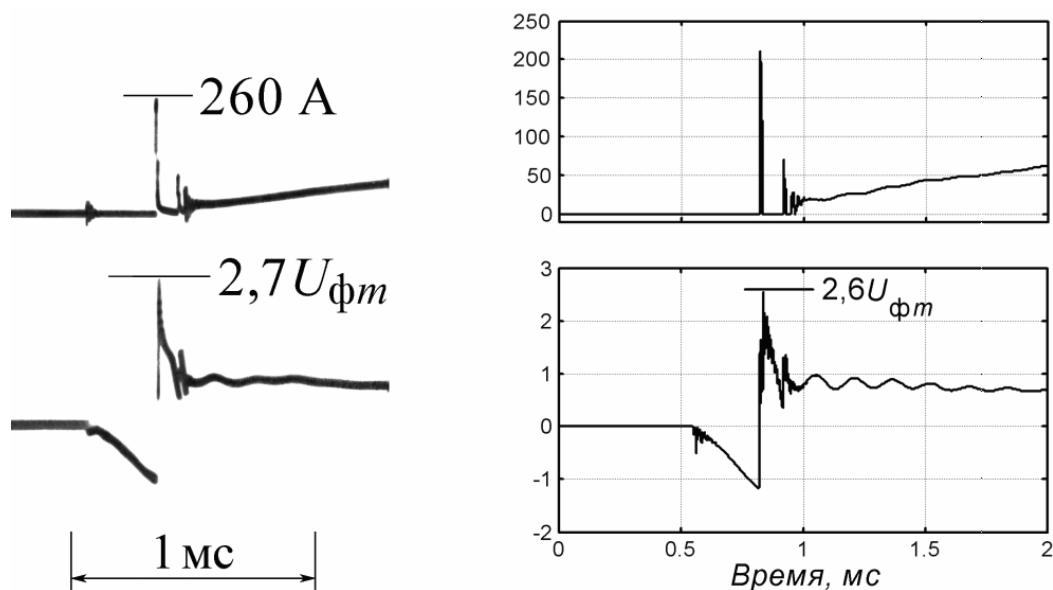


Рисунок 4. Сравнение осциллограммы, полученной при экспериментах с осциллограммами тока в выключателе и напряжения в начале кабеля, полученными при расчетах (длина кабеля 230 м, мощность ЭД 250 кВт)

В результате исследований перенапряжений, сопровождающих отключение неразвернувшегося ЭД ВВ, выяснилось, что «наиболее неблагоприятными» с точки зрения возникающих при эскалации перенапряжений являются присоединения с короткими кабелями и ЭД мощностью $500 \div 2000$ кВт. Изоляция этих ЭД будет подвергаться опасным воздействиям в широком диапазоне скорости восстановления электрической прочности ВДК. В то же время, расчеты показали, что уровни перенапряжений, сопровождающих отключение ЭД 6 кВ мощностью $4000 \div 8000$ кВт, а также ЭД 10 кВ мощностью $6300 \div 8000$ кВт, во всех случаях не превосходили значений, необходимых для «срабатывания» ОПН. Следовательно, применение ОПН для защиты изоляции этих ЭД не целесообразно. Анализ эффективности защитных аппаратов ОПН, проведенный на присоединениях насосных станций при варьировании характеристик восстановления электрической прочности межконтактного промежутка, показал, что при определенных параметрах ВДК «Siemens» выключателя ВБКЭ-10 результаты расчетов практически совпали с результатами экспериментальных исследований. На рис.5 приведены фрагменты расчетных и экспериментальных осциллограмм процесса отключения присоединения с ЭД 2000 кВт и длиной кабельной линии 550 м при защите изоляции ЭД ОПН-10/11 фирмы «Феникс-88».

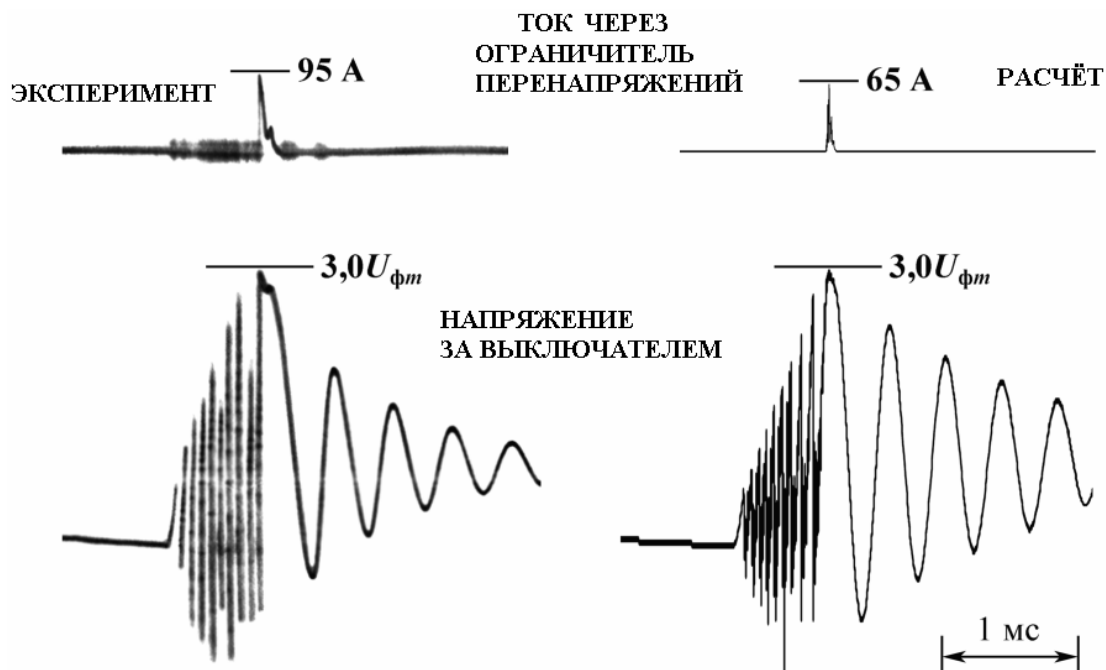


Рисунок 5. Сравнение экспериментальных и компьютерных осциллограмм процесса отключения неразвернувшегося ЭД вакуумным выключателем

Основные характеристики, полученные в результате моделирования, связанные с коммутационной способностью ВДК:

- диапазон значений скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка выключателей ВБКЭ-10 находится в пределах $44 \div 64$ кВ/мс.

- Критическая скорость отключаемого высокочастотного тока при повторных зажиганиях дуги имеет достаточно высокие значения, которые согласно расчету, могут варьироваться в пределах $250 \div 350$ А/мкс. Кроме того, есть основания предполагать, что величина di/dt в процессе эскалации может изменяться.

- срез тока составил уровень 5 А;

Расчетный уровень перенапряжений на выводах ЭД, составил уровень $3,5U_{фm}$, т.е. превышал величину, принятую для оценки электрической прочности корпусной изоляции ЭД ($2,8U_{фm}$) [4-5].

Расчеты перенапряжений, проведенные при варьировании характеристик присоединений и параметров ВВ, показали, что эффективное ограничение перенапряжений при отключении ЭД 6-10 кВ возможно лишь при подключении ОПН непосредственно к выводам ЭД. Приемлемый уровень перенапряжений

может быть достигнут и при установке ОПН сразу за выключателем присоединения, однако при этом длина кабельной линии, питающей ЭД, должна быть не более 25- 30 м.

Исследования позволили также выявить требования к энергоемкости защитных аппаратов. Выяснилось, что даже при самых неблагоприятных расчетных условиях, энергия, поглощаемая варисторами ОПН, невелика. Расчеты показали, что в отличие от ОПН, применение для защиты изоляции ЭД демпфирующей RC -цепочки (устанавливаемой либо за выключателем присоединения, либо на выводах ЭД) приводит к более глубокому ограничению уровней перенапряжений, а также к существенному снижению количества повторных зажиганий дуги (или к полному исключению повторных зажиганий). Это связано с тем, что RC -цепочка оказывается подключенной с самого начала переходного процесса, в то время как защитное действие ОПН начинает проявляться лишь при достаточном для его «срабатывания» уровне напряжения.

Основные выводы

1. Любое включение ЭД вакуумным выключателем сопровождается явлением повторных пробоев в вакуумных промежутках смыкающихся фаз. Повторные пробои представляют опасность для изоляции ЭД из-за высокой крутизны волн напряжения, воздействующих на обмотку. Для ограничения перенапряжений, возникающих при включении электродвигателя, необходимо регулировать ВВ на одновременное смыкание контактов.

2. Наиболее опасной с точки зрения перенапряжений является операция отключения неразвернувшегося двигателя. Кратности перенапряжений в начале кабеля могут достигать $3.0 U_{фм}$, а на выводах двигателя – $3.5 U_{фм}$, что может вывести двигатель из строя.

3. Основной характеристикой ВВ, определяющей эскалацию напряжений, является скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка.

4. Проведенные натурные эксперименты коммутаций отключения неразвернувшегося двигателя вакуумным выключателем ВБКЭ-10 позволили уточнить характеристики ВДК «*Siemens*» этого выключателя:

- срез тока составляет 5 А;
- скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка находится в пределах $44 \div 64$ кВ/мс;
- критическая скорость отключаемого высокочастотного тока при повторных зажиганиях дуги может принимать значения в диапазоне $250 \div 350$ А/мкс.

При этих характеристиках результаты компьютерных расчетов и реальных экспериментов практически совпали между собой, что может служить доказательством правомочности принятой математической модели процессов. Разработанные математические модели позволяют рассмотреть в комплексе перенапряжения, при различном сочетании характеристик вакуумного выключателя и параметров присоединений и могут быть использованы при выборе мер защиты от перенапряжений на присоединениях любых объектов.

Литература

1. Вольпов К.Д., Белый Ю.В. О повреждаемости изоляции электродвигателей собственных нужд электростанций. // Электрические станции. – 1976. – №6. – с.34-35.
2. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.Н. Причины повреждений электродвигателей в пусковых режимах на блочных электростанциях. // Электрические станции. – 1974. – №4. – с.33-35.
3. A. Greenwood, M. Glinkowski. Voltage escalation in vacuum switching operation. // IEEE Trans. on Power Delivery. – Vol.3 , №4, October 1988. – P.1698-1706.
4. Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических 6...35 кВ. Новосибирск. – НГТУ. – 1993. – 158 с.
5. Евдокунин Г.А., Корепанов А.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение. // Электричество. – 1998. – №4. – с.2-14.