**Абдурахманов Абдула Мухтарович. Разработка моделей надежности коммутационного оборудования и рекомендаций по их применению в задачах электроэнергетики : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.02 / Абдурахманов Абдула Мухтарович; [Место защиты: ГОУВПО "Московский энергетический институт (технический университет)"]. - Москва, 2008. - 132 с. : 7 ил.**

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

**Ю4.20 0.Є 08205 -**

Абдурахманов Абдула Мухтарович

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

05.14.02 - Электростанции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор

Шунтов А.В.

Москва, 2007 г.

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

*Глава первая.* АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОММУТА­ЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 11

1. Постановка задачи 11
2. [Анализ моделей надежности 12](#bookmark1)
3. [Показатели надежности 19](#bookmark2)
4. [Выводы 22](#bookmark3)

*Глава вторая.* ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 25

1. Постановка задачи 25
2. [Модель потока отказов 26](#bookmark4)
3. [Классификация отказов 29](#bookmark6)
4. [Модель надежности выключателя 35](#bookmark7)
5. [Модель надежности системы сборных шин 40](#bookmark8)
6. Динамика характеристик надежности 42
7. [Статистические методы обработки результатов 43](#bookmark9)
8. [Выводы 46](#bookmark10)

*Глава третья.* ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 48

1. [Постановка задачи 48](#bookmark11)
2. [Структура параметра потока отказов выключателей 49](#bookmark12)
3. [Модель отказов присоединений 53](#bookmark13)
4. [Модель отказов систем сборных шин 65](#bookmark14)
5. [Время восстановления 71](#bookmark15)
6. [Динамика параметра потока отказов выключателей 73](#bookmark16)
7. [Статистическая оценка результатов 82](#bookmark19)
8. [Выводы 85](#bookmark20)

*Глава четвертая.* СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ НА­ДЕЖНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 89

1. [Постановка задачи 89](#bookmark21)
2. Практические методы оценки надежности схем электроустановок ... 89
3. [Сравнительная оценка моделей в кольцевых схемах 102](#bookmark26)
4. [Сравнительная оценка моделей в радиальных схемах 110](#bookmark29)
5. [Учет систем сборных шин 116](#bookmark31)
6. [Выводы 118](#bookmark32)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 120

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 125

ПРИЛОЖЕНИЕ 133

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения надежности электроэнергетических систем (далее сокращенно энергосистем или систем) была и остается актуальной. Анализ фактического материала показывает, что проблеме оценки надежности схем электроустановок уделяется все больше внимания. В частности, в последнее время в силу известных причин возрос интерес к проблеме как обеспечения на­дежности энергосистем на стадии ввода новых генерирующих мощностей, так и при сооружении подстанций и линий электропередачи.

При решении задачи оценки надежности схем электроустановок, необхо­димо располагать объективными методами оценки надежности. Их основой яв­ляются математические модели элементов схем электроустановок. В свою оче­редь, от корректного выбора моделей зависит как простота и удобство анализа, так и достоверность результатов оценки надежности.

В настоящее время в нашей стране существуют более десяти методик оценки надежности схем электрических соединений электроустановок. Основ­ное отличие методик заключается в модели надежности коммутационного обо­рудования. Помимо этого возникает достаточно большой разброс в приводимых различными авторами показателях надежности.

*Таким образом, возникает проблема выбора методики оценки надежно­сти, модели надежности и показателей надежности коммутационного обору­дования.*

Теоретические основы существующих методов отражены в многочислен­ных отечественных и зарубежных публикациях. Так, в работах [Bl, В2] иссле­дована эксплуатационная надежность оборудования распределительных уст­ройств (РУ) на начальном этапе формирования отечественных энергосистем и предложены модели отказов оборудования. В [ВЗ-В16] предложены различные по уровню учитываемых факторов модели надежности оборудования.

Однако в созданных методиках, как правило, *не приводятся расчетные условия, при которых получена модель надежности коммутационного оборудо­вания. В итоге за полувековую историю у специалистов так и не сформирова-*

**4**

*лось его общепринятой модели отказа, а по большому счету и доверия к ре­зультатам оценки надежности схем электрических соединений.*

Моделью надежности коммутационного оборудования необходимо распо­лагать при решении относительно разноплановых задач, в том числе: обоснова­нии конструкций выключателей, оценке надежности схем электроустановок, при определении частоты планово-предупредительных ремонтов или межре­монтных периодов. Таким образом, модели надежности следует классифициро­вать в соответствии с классом решаемой задачи. Как показывает анализ факти­ческого материала, а именно статистических данных по отказам, в модели на­дежности коммутационного оборудования требуется учитывать свойства на­дежности электрических аппаратов (собственно выключателя с приводом, из­мерительных трансформаторов, разъединителей), устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), условия ремонтно-эксплутационного обслуживания, природ­но-климатические и ряд других факторов.

Таким образом, существо *научно-технической проблемы,* которой была посвящена диссертационная работа, состояла в исследовании структуры отка­зов коммутационного оборудования в энергосистемах путем обобщения об­ширных фактических статистических данных, выявления причинно­следственных связей основных влияющих факторов и на этой основе - разра­ботке научно обоснованных рекомендаций по формированию и использованию моделей надежности рассматриваемого оборудования при решении проектно­конструкторских и эксплуатационных задач: совершенствование конструкций выключателей и РУ, планирование их ремонтно-эксплуатационного обслужива­ния, а также обоснование и выбор схем электрических соединений электроуста­новок.

*Цель работы и задачи исследований.*

*Цель работы* заключается в создании теоретических и практических по­ложений, связанных с разработкой и уточнением моделей надежности коммута­ционного оборудования в энергосистемах с учетом фактических эксплуатаци­онных данных за длительный временной интервал в одной из крупнейших элек­тросетевых компаний страны, совокупность которых представляет решение на­учно-технической задачи, имеющей существенное значение для электроэнерге­тической отрасли.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

* выявлены статистические закономерности в структуре отказов коммута­ционного оборудования путем обобщения обширного фактического материала и исследования динамики соответствующих параметров надежности в сетях ПО- 75 0 кВ энергосистем;
* проанализирована эволюция моделей надежности коммутационного оборудования в схемах коммутации электроустановок, обоснованы причинно­следственные связи в структуре отказов;
* сформированы научно обоснованные рекомендации по применению мо­делей надежности коммутационного оборудования в схемах коммутации 110 кВ и выше.

*Достоверность основных теоретических положений* определяется тем, что полученные результаты подтверждены значительными объемами фактиче­ских статистических данных, детальным анализом основных влияющих факто­ров, расчетных условий и причинно-следственных связей, а так же опытом про­ектирования и эксплуатации объектов электросетевых объектов на современном этапе.

*Научная новизна* работы и *личный вклад* автора состоит в решении на­учно-технической задачи, имеющей существенное значение для электроэнерге­тической отрасли и заключающейся в разработке научно обоснованных реко­мендаций, связанных с выбором моделей надежности коммутационного обору­дования в энергосистемах при решения проектно-конструкторских и эксплуата­ционных задач.

*Новое решение* этой задачи заключается в исследовании причинно­следственных связей, проявляющихся в структуре, параметрах и динамике отка­зов коммутационного оборудования сетей 110-750 кВ одной из крупнейших электросетевых компаний. Такая концепция реализована впервые и потребовала привлечения обширных статистических данных. В результате автором диссер­тационной работы впервые получены следующие новые научные результаты:

1. Реализован комплексный подход к разработке и уточнению моделей надежности коммутационного оборудования в сетях 110-750 кВ, заключаю­щийся в исследовании причинно-следственных связей основных влияющих факторов, а также поиске и учете новых свойств этих моделей. Это позволило предложить в рассматриваемой предметной области новые взгляды на тради­ционно принимаемые решения, влияющие на надежность и экономичность энергосистем.
2. Доказано, что поток отказов коммутационного оборудования имеет сложную структуру, кроме того, зависящую от длительности эксплуатации оборудования, и приводит к многократным разбросам значений рассматривае­мого параметра: в 2-6 раз по компонентам и в 4—5 раз по длительности экс­плуатации. Это принципиально и важно учитывать при совершенствовании конструкций выключателей, планировании их ремонтно-эксплуатационного об­служивания, а так же при обосновании и выборе схем электрических соедине­ний электроустановок.
3. Установлена нелинейная взаимосвязь между продолжительностью экс­плуатации коммутационного оборудования и его параметром потока отказов, что позволило сформулировать рекомендации по повышению качества работ в электроустановках и совершенствованию системы учета технологических на­рушений в энергосистемах.
4. Уточнены модели надежности коммутационного оборудования в энер­госистемах, что дает возможность более обоснованно подойти к решению ком­плексной задачи обеспечения надежности и экономичности режимов работы электростанций, электрических сетей и энергосистем в целом.

*Практическое значение и внедрение.*

1. Примененный подход и полученные на его основе рекомендации по моделям надежности коммутационного оборудования в энергосистемах позво­ляют на практике повысить достоверность и устойчивость принимаемых реше­ний, а также надежность и экономичность электроустановок.

2. Разработанные практические рекомендации, а так же обобщенные ста­тистические данные используются в «Магистральных электрических сетях Центра» (МЭС Центра) - филиале ОАО «ФСК ЕЭС» при решении широкого спектра задач ремонтно-эксплуатационного обслуживания: совершенствования конструкций выключателей, планирования их ремонтов, а также обоснования и выбора схем энергообъектов при новом строительстве, реконструкции и техни­ческом перевооружении.

*Основные положения, выносимые на защиту:*

1. Применение комплексного подхода к оценке моделей надежности ком­мутационного оборудования в сетях 110-750 кВ энергосистем.
2. Обоснование структуры и параметров отказов коммутационного обо­рудования в энергосистемах.
3. Оценка областей применения моделей надежности коммутационного оборудования в схемах коммутации 110 кВ и выше.

*Апробация работы.*

По результатам исследований сделаны доклады на следующих конферен­циях: 11-я, 12-я и 13-я международная научно-техническая конференция сту­дентов и аспирантов (Москва, 2005, 2006, 2007).

В полном объеме диссертация докладывалась на 79-м международном научном семинаре им. Ю.Н.Руденко «Методические вопросы исследования на­дежности больших систем энергетики» (Вологда, 2007) а также на заседании кафедры электрических станций Московского энергетического института (Тех­нического университета) (Москва, 2007).

*Публикации* по проведенным исследованиям имелись в журналах «Электричество» (2007), «Электрические станции» (2005, 2005, 2007, 2007), в трудах трех конференций. Количество публикаций по теме диссертации со­ставляет девять печатных работ, из них пять в центральных изданиях.

*Объем и структура работы.* Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения (актов внедрения результатов работы).

*В первой главе* анализу подвергнуты существующие методы оценки на­дежности схем электроустановок и модели отказов коммутационного оборудо­вания. Проведен сравнительный анализ и критический обзор публикаций по проблеме. Выполнена общая постановка задачи. Сформулирована методологи­ческая направленность исследований. Показано, что структура параметра пото­ка отказов выключателя должна соответствовать классу решаемой задачи, будь то анализ конструкций электрических аппаратов, планирование их ремонтно­эксплуатационного обслуживания или обоснование и выбор схем коммутации электроустановок.

*Во второй главе* сформированы модели надежности коммутационного оборудования, которые позволяют по результатам исследования и обработки статистических данных по отказам выбрать наиболее предпочтительные и объ­ективные модели надежности коммутационного оборудования.

*В третьей главе* выполнено обоснование моделей надежности на осно­вании анализа статистических данных работы коммутационного оборудования в нашей стране и за рубежом как для присоединения, так и для систем сборных шин в отдельности. Выявлены причинно-следственные связи в обширных мас­сивах исследованных отказов. В частности оценено влияние средств РЗА на на­дежность присоединения. Составлена классификация отказов и структура па­раметра потока отказов. Выявлена динамика изменения параметра потока отка­зов в зависимости от срока эксплуатации. Анализируются статистические дан­ные по отказам за рубежом. Предложена модель отказа выключателя, коррели­руемая с фактическими эксплуатационными данными. Даны рекомендации по выбору средств повышения надежности коммутационного оборудования

*В четвертой главе* выполнено сравнение методик оценки надежности схем электроустановок при использовании существующих и на базе предло­женной новой более объективной модели надежности коммутационного обору­дования и системы сборных шин. По результатам оценок даны рекомендации по выбору конкретных моделей надежности коммутационного оборудования.

По мнению автора, проведенные исследования по изучению надежности коммутационного оборудования, а так же схем РУ в энергосистемах и получен­ные новые результаты окажутся полезными для инженерно-технических работ­ников проектных организаций, энергосистем, а также студентов вузов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработаны теоретические и практические положения, связанные с выбором моделей и показателей надежности коммутационного оборудования в условиях фактической эксплуатации реальных энергосистем, совокупность которых представляет решение научно-технической задачи, имеющей существенное значение для электроэнергетической отрасли.

1. Реализован комплексный подход к разработке и уточнению моделей надежности коммутационного оборудования в сетях 110-750 кВ, заключающийся в исследовании причинно-следственных связей основных влияющих факторов, а также поиске и учете новых свойств этих моделей. Это позволило предложить в рассматриваемой предметной области новые взгляды на традиционно принимаемые решения, влияющие на надежность и экономичность энергосистем.

При этом необходимо, что бы структура параметра потока отказов выключателя соответствовала классу решаемой задачи, будь то анализ конструкций электрических аппаратов, планирование их ремонтно­эксплуатационного обслуживания или обоснование и выбор схем коммутации электроустановок.

1. Доказано, что параметр потока отказов коммутационного оборудования имеет объемную структуру, кроме того, зависящую от срока эксплуатации оборудования, и приводит к многократным разбросам значений рассматриваемого параметра: в 2—6 раз по компонентам и в 4—5 раз по сроку эксплуатации. Это принципиально и важно учитывать при совершенствовании конструкций выключателей, планировании их ремонтно­эксплуатационного обслуживания, а так же при обосновании и выборе схем электрических соединений электроустановок.
2. Установлена взаимосвязь между продолжительностью эксплуатации коммутационного оборудования и его надежностью, что позволило сформулировать рекомендации по повышению качества работ в

электроустановках и совершенствованию системы учета технологических нарушений в энергосистемах.

Большое количество отказов выключателей в начальной зоне приработки заставляет обратить пристальное внимание на состояние работ по приемо-сдаточным испытаниям оборудования. Недопустимо, когда на первые годы эксплуатации приходится до 25-40% всех отказов выключателей.

Стабилизация количества отказов выключателей на уровне 2%/год. (в пять раз меньше, чем на начальных этапах эксплуатации) на длительных временных интервалах, исчисляемых десятками лет, — положительный фактор. Однако необходимо тщательное технико-экономическое сопоставление целесообразности поддержания в работоспособном состоянии устаревших и снятых с производства выключателей по сравнению с заменой их на новые типы оборудования.

1. Уточнены модели надежности коммутационного оборудования в энергосистемах, что дает возможность более обоснованно подойти к решению комплексной задачи обеспечения надежности и экономичности режимов работы электростанций, электрических сетей и энергосистем в целом. .

Получены новые практические результаты:

1. Предложены рекомендации по объективному выбору моделей надежности коммутационного оборудования в энергосистемах при решения проектно-конструкторских и эксплуатационных задач, позволяющие повысить надежность и экономичность электроустановок:

— принципиально- и важно учитывать при решении задач совершенствования конструкций выключателей и распределительных устройств, планирования их ремонтно-эксплуатационного обслуживания, а так же при обосновании и выборе схем электрических соединений электроустановок учитывать структуру параметра потока отказов. В общем случае, если за базисное значение взять отказы собственно выключателей с приводом (100%), значение параметра потока отказов при учете структуры может изменяться в достаточно широких диапазонах (до 2-6 раз). Эти значения могут существенно измениться в большую сторону (до 12 раз), если учесть динамику параметра потока отказов;

* при рассмотрении модели надежности с классификацией отказов коммутационного оборудования по условию возникновения, будь то в

статическом состоянии, при оперативных переключениях или при

отключении КЗ, допустимо не выделять отказы при отключении КЗ из общей группы отказов. Анализ фактического материала показывает, что отказы в статическом состоянии, при оперативных переключениях и отказы при отключении КЗ проявляются достаточно равномерно: их частота

возникновения в среднем составляет 30-40%. Таким образом, в модели отказа коммутационного оборудования не имеет большого смысла особо выделять отдельные режимы;

* классификация отказов по месту установки выключателей в схеме коммутации в целом себя оправдывает, поскольку аварийность

выключателей в цепях линий электропередачи на 6—25% выше, чем в других цепях. Однако данный фактор менее важен по сравнению с корректностью учета многокомпонентности при определении параметра потока отказов (см. выше). Поэтому для упрощения расчетов надежности схем электрических соединений, по-видимому, допустимо не разделять отказы выключателей’по месту их установки;

* структура отказов по их распределению между составляющими присоединения (собственно выключатель с приводом, трансформаторы тока, разъединители с ошиновкой, средства РЗА привязанные к ячейке) показал, что в ряде случаев собственно выключатель с приводом не является первопричиной отказа присоединения. Так по статистическим данным отношение количества отказов выключателей из-за нарушений работы устройств РЗА к отказам собственно выключателей с приводами составляет 0,57; 0,77; 0,64; 1,46 и 0,71 при напряжении соответственно 110; 220; 330; 500

и 750 кВ. Таким образом, в ряде случаев влияние РЗА на параметр потока отказов выключателей более весомый фактор по сравнению с их конструктивными особенностями и условиями ремонтно-эксплуатационного обслуживания, что принципиально и важно учитывать при решении задач повышения надежности схем электроустановок;

* известные типы отказов выключателя («КЗ в одну (каждую) сторону», «КЗ в обе стороны», «разрыв») фактически можно рассматривать в качестве условно независимых случайных событий, поскольку на каждого из них ориентировочно пришлось *Ул* общего числа отказов выключателей. Данный факт подтверждает вывод П.Г.Грудинского, полученный 50- лет назад, что лишь *Уг* отказов присоединений приводит к отключению сборных шин электроустановок в схеме с двумя системами сборных шин. Действительно, погашение системы сборных шин в рассматриваемой^ схеме\* происходит при\* отказе типа «КЗ в обе стороны» *(Ул* отказов) и отказе типа \* «КЗ в одну сторону» (!Л отказов) - в сторону сборных шин. Таким образом, публикуемые последние десятилетия в специализированной литературе значения коэффициента, характеризующего долю отказов типа «КЗ в обе стороны» на уровне 0,6-0,7 и более представляются необоснованно завышенными;
* погашения подстанций 500 кВ из-за отказов на сборных шинах 110-220 кВ, т.е. на вторичной стороне подстанций, преимущественно связаны с тем, что на них использованы схемы коммутации с двумя

системами сборных шин. В таких схемах на каждом присоединении;

присутствуют развилки из двух шинных разъединителей. Поэтому часть отказов приводит к неустраненным КЗ, одновременно затрагивающим обе- системы сборных шин. Ситуация усугубляется еще и тем, что шинные разъединители выполняют оперативные функции. Это так же увеличивает количество отказов, приводящих к одновременному погашению обеих

систем сборных шин. Поэтому, при реконструкции подстанций необходимо стремиться к использованию в РУ 110-220 кВ схемы с одной

секционированной системой сборных шин с обходной. В таких схемах практически исключены оперативные функции шинных разъединителей и отказы, связанные с одновременным погашением обеих секций системы сборных шин. Использование схемы с двумя системами сборных шин, следует считать вынужденным решением и должно требовать в проектах специального обоснования, в первую очередь, с режимных позиций;

- более 1/3 отказов на сборных шинах 110-220 кВ, зафиксированных в период 1993—2004 гг., связаны со старением оборудования. При анализе эксплуатационной надежности сборных шин за период 1978-1992 гг. данный фактор не был заметен. Это свидетельствует о необходимости пристального внимания к первоочередным мероприятиям по организации ремонтной деятельности на предприятиях отрасли, а также к модернизации и техническому перевооружению электроустановок.

Использование практических результатов:

1. Примененный подход и полученные на его основе рекомендации по моделям надежности коммутационного оборудования в энергосистемах

позволяют на практике повысить достоверность и устойчивость

принимаемых решений, а также надежность и ’ экономичность

электроустановок.

1. Разработанные практические рекомендации, а так же обобщенные статистические данные используются в «Магистральных электрических сетях Центра» (МЭС Центра) - филиале ОАО «ФСК ЕЭС» при решении широкого спектра задач ремонтно-эксплуатационного обслуживания:

совершенствования конструкций выключателей, планирования их ремонтов, а также обоснования и выбора схем энергообъектов при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ источников**

ISISI

В.1. Грудинский П.Г. Схемы коммутации электрических станций и под­станций. M.-JL: Госэнергоиздат, 1948.

В.2. Грудинский П.Г. Анализ повреждаемости и условий эксплуатации в распределительных устройствах 110-220 кВ и выводы для проектирования. М.: Министерство электростанций, 1957.

В.З. Ерхан Ф.М., Неклепаев Б.Н. Токи короткого замыкания и надежность энергосистем. Кишинев: Штиинца, 1985.

В.4. Трубицын В.И. Надежность электростанций. - М: Энергоатомиздат,

1997.

В.5. Галлиев И.Ф. Методы расчета надежности энергоустановок электро­станций. — Казань: КГЭУ, 2005.

В.6. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энер­гоатомиздат, 1984.

В.7. Двоскин Л.И. Схемы и конструкции распределительных устройств. М.: Энергия, 1974. ’

В.8. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. М.: Высшая шко­ла, 1984.

В.9. Синьчугов Ф.И. Выбор главных схем электрических соединений блочных электростанций // Электрические станции. 1967. №5.

В. 10. Синьчугов Ф.И. Расчет надежности схем электрических соедине­ний. М.: Энергия, 1971. •

В.11. Синьчугов Ф.И. Основные положения расчета надежности электро­энергетических систем// Электричество. 1980. №4. (Дискуссии - Лосев Э.А. Ос­новные положения расчета надежности электроэнергетических систем// Элек­тричество. 1981. №9.

В.12. Жданов В. С. Технико-экономичесая оценка вариантов схем распре­делительных устройств с учетом надежности. Учебное пособие для курсового проектирования. - М.: МЭИ, 1979.

В: 13. Грудинский П.Г., Эдельман В.И. Применение метода блок-схем для расчета надежности систем электроснабжения// Электрические станции. 1973. **№2.**

В. 14. Грудинский П.Г., Горский Ю.М. Метод оценки надежности схем электроснабжения // Труды Московского энергетического института. M.-JL: Госэнергоиздат, 1956, вып. XX.