



Автор:
д.т.н. Барканс Е.,
Рижский Технический
университет (RTU),
г. Рига, Латвия.

ЗАЩИТА ОТ РАЗВАЛОВ И САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Аннотация: на основе анализа развалов, произошедших с середины прошлого века, выяснено, что в основном их причиной являются перегрузки линий питающих электрических сетей. Показано, что для защиты от развалов может быть использован комплекс средств, использующихся пока разрозненно, дополненных средствами автоматики и телеуправления с помощью логических сигналов. При этом большое значение приобретает эффект самовосстановления энергосистем до нормального режима без участия персонала за время порядка 100 секунд, что преобразует тяжелую аварию в переходной процесс, который для большинства потребителей оказывается практически незаметным.

Ключевые слова: развалы, защита, самовосстановление.

Введение

Для решения проблемы защиты энергосистем от развалов и тяжелых аварий необходимо было исследовать ход этих аварийных процессов в различных частях мира. Всего использованы анализы более 30-ти случаев, произошедших начиная с 50-ых годов прошлого века. Перечень основных из них приводится в таблице 1.

На первый взгляд может показаться, что разнообразие элементов аварийных событий столь велико, что ему не может соответствовать реальное разнообразие средств защиты, и с развалами приходится мириться. На самом деле разнообразие событий вовсе не столь велико и эффективная защита вполне возможна. Для этого должна быть подготовлена инфраструктура защиты, основные элементы которой в энергосистемах имеются, но используются разрозненно.

В основе идеологии защиты от развалов – отношение к роли персонала. Эта роль велика в процессе подготовки надежного нормального режима. Однако за лавинными процессами, возникающими в неблагоприятных условиях, персонал уследить не в состоянии и сможет включиться в дело лишь в послеварийном режиме. Следовательно, при рассмотрении возможностей защиты от возникающих развалов персонал должен быть исключен из процесса. Действия защиты, автоматики и процесса восстановления должны рассматриваться как происходящие без его участия.

Энергосистема – технический организм. Его защита может рассматриваться по аналогии с защитой живого организма. В этом случае в защиту должны включаться внутренние обратные связи, обеспечиваемые системой, похожей на действие иммунной системы. Подобные средства должны

Табл. 1. Развалы и тяжелые аварии

№	Даты	Энергосистема
1	09.11.1965	США Северо-Восток - Канада
2	05.06.1967	США
3	14.07.1977	Нью-Йорк
4	19.12.1978	Франция
5	04.08.1982	Бельгия
6	14.12.1982	Канада
7	27.12.1983	Швеция
8	12.01.1987	Франция
9	22.08.1987	США (Tennessee)
10	21.02.1998	США (PESCO)
11	26.04.1998	США
12	08.06.1999	Израиль
13	03.07.1996	Запад США – Канада
14	10.08.1996	Запад США – Канада
15	20.06.1998	Бангладеш
16	25.06.1998	США Север -Запад
17	11.03.1999	Бразилия
18	07.07.1999	США Север-Восток
19	11.1999	Япония
20	21.01.2002	Бразилия
21	12.01.2002	Хорватия
22	14.08.2003	США – Канада
23	23.09.2003	Швеция – Дания
24	28.09.2003	Италия
25	12.07.2004	Греция
26	14.03.2005	Австралия
27	25.05.2005	Москва
28	04.11.2006	Европейская энергосистема
29	25.06.2008	Белоруссия
30	10.05.1964	Латвия
31	01.09.1965	Латвия (самовосстановление)
32	18.07.1967	Латвия (самовосстан. четырежды)

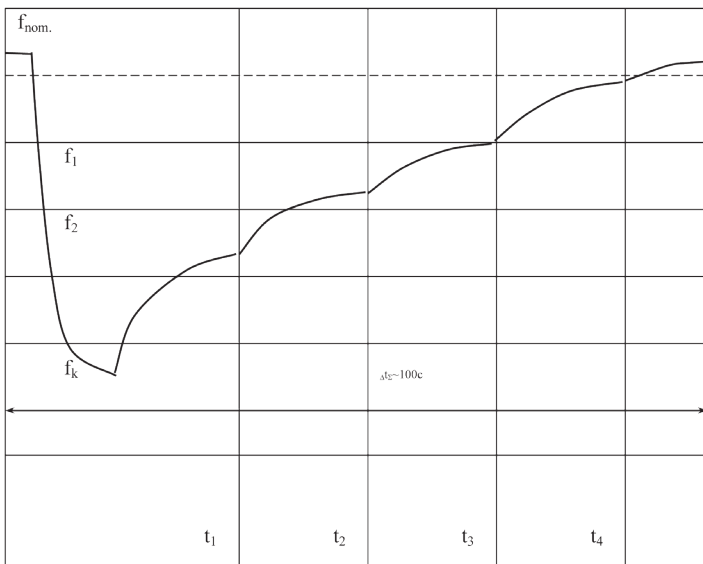


Рис. 1. Автоматическое восстановление частоты

быть подобраны в целях использования возможностей самовосстановления энергосистем при возникновении ситуаций, могущих привести к развалу.

1. Опыт применения принципа самовосстановления.

Исходным положением в свое время была ситуация, когда в дефицитной энергосистеме, работавшей в условиях слабой межсистемной сети, возникали развалы при разделении энергосистемы на части.

Для устранения систематических развалов автор (бывший главным диспетчером энергосистемы), при содействии группы работников релейной защиты, внедрил дополнительно к имевшейся в то время автоматике следующие элементы [1]:

А. Медленную частотную разгрузку, имев-

шую единую, чуть более низкую от номинальной частоты, уставку срабатывания, очереди которой срабатывали с нарастающими выдержками времени и после пуска перенастраивали собственную уставку возврата на уровень, близкий к номинальной частоте с целью ее восстановления до номинального значения (рис. 1). Впоследствии это было включено в Руководящие противоаварийные указания Минэнерго под названием АЧР-2.

Б. На всех очередях АЧР были смонтированы автоматы повторного включения потребительских линий по признаку существования номинальной частоты в течение 15-20 секунд после ее восстановления.

Учитывая, что комплексная частот-

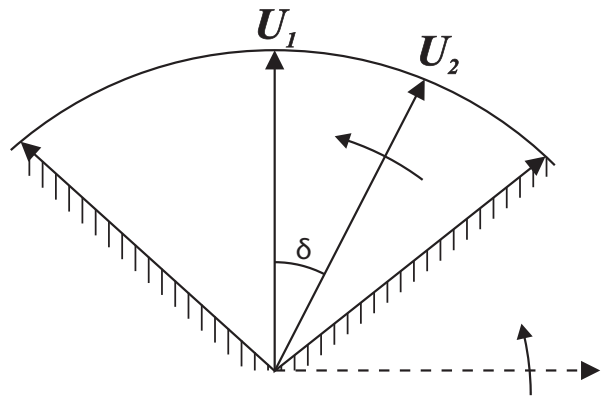


Рис. 2. Область действия устройства контроля синхронизма

ная разгрузка (АЧР-1)+(АЧР-2) является системой с обратной связью, процесс осуществляется с высокой точностью.

Для внедрения автоматики на объектах энергосистемы потребовался монтаж необходимых дополнительных элементов к той части АЧР-1, которая предназначалась для медленной разгрузки и оснащение всех автоматов АЧР комплектами частотного АПВ. Работа была завершена в течение года и внедрена в 1964 году.

Процесс воссоединения энергосистемы после разделения предусматривался в виде самопроизвольного включения отделившихся линий с помощью автоматических синхронизаторов, имеющихся на межсистемных связях, либо устройств контроля синхронизма. В последнем случае это происходит при условии, что векторы напряжения находятся в пределах сектора контроля больше секунды. В этом случае разность частот на отделившихся линиях оказывается меньше 0,2 Гц и эти устройства (рис. 2) воспринимают ситуацию как сохранение синхронизма, давая сигнал на включение.

Включение происходит одновременно на отделившихся линиях при переходном процессе с затухающими колебаниями, показанном на рис. 3, при небольших токах включения [2].

Успешность включения для представляющих интерес случаев может быть предварительно проверена с помощью специального алгоритма, предусмотренного в программе Мустанг, которая воспроизводит ситуацию включения двух частей энергосистем при отличающихся частотах [3].

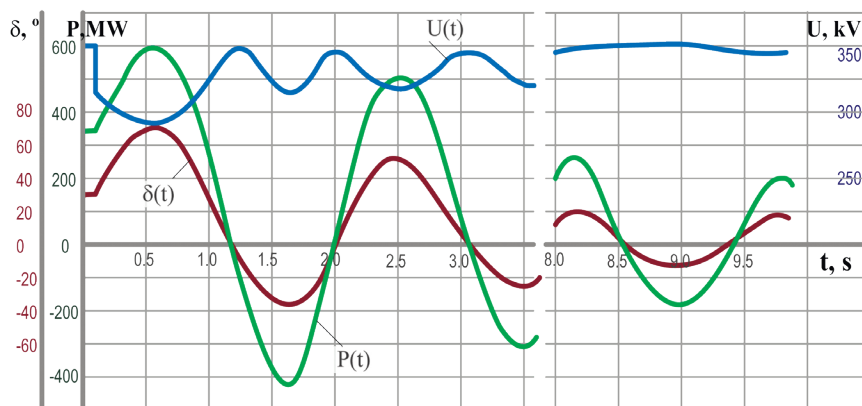


Рис. 3. Затухающий переходный процесс ресинхронизации



После этого по признаку предшествующего срабатывания АЧР и последующего существования нормальной частоты в течение 15-20 секунд с помощью частотных АПВ (ЧАПВ) восстанавливается питание отключенных потребителей.

На этом ликвидация аварии завершена. Процесс, который в прошлом часто приводил к развалу энергосистемы, оказался замещенным переходным процессом, завершающимся за 100 секунд. Ход процесса самовосстановления режима внешне заметен лишь кратковременно отключившимися потребителями, технология которых была кратковременно прервана. Остальные потребители этого перехода практически не замечали. Психологически это объясняется тем, что похожие ситуации у потребителей случаются примерно 20 раз в течение года из-за отключений магнитных пускателей, сопровождающих понижения напряжения при коротких замыканиях в сети, к чему они вполне адаптированы.

Здесь впору сделать небольшое отступление.

Работа по совершенствованию автоматики энергосистемы, которая требовала целого года, была масштабной, но не очень сложной. Очередная крупная авария после завершения работы произошла в 1965 году 10 октября во время вечернего максимума нагрузки. Будучи дома, слушал музыку по батарейному радиоприемнику от местной радиостанции и вдруг погас свет, а затем прекратилась музыка. Радиостанция как особо ответственный потребитель подключена к последней очереди АЧР. Ясно – крупная авария. В подобной ситуации не принято отвлекать диспетчера телефонным звонком. Бросился в находившуюся у дома машину и через 10 минут зашел на диспетчерский пункт, ожидая увидеть бледного от волнения диспетчера. А он как ни в чем не бывало спокойно пил чай. Ему пришлось наблюдать, как все рухнуло, а через неполные полторы минуты восстановилось. Система «Ванька – встанька» (неваляшка), как и предполагалось, превосходно работает. Решил руководству об этом пока не сообщать, в ожидании реакции на следующий день. А реакции никакой не было. Незаметили...

Система самовосстановления, находившаяся в длительной эксплуатации, сра-

батывала 20 раз, каждый раз обеспечивая в течение 100 секунд практически незаметный для большинства возврат из аварийного состояния в нормальный режим.

Дополнительный эффект от применения принципа самовосстановления – улучшение условий работы дежурного персонала – прекращение постоянного ожидания опасности и тяжелых стрессов от развалов.

Исходным для самовосстановления было разделение энергосистемы, при котором кратковременный дефицит активной мощности реально проявляется и ликвидирует комплексной системой автоматики с последующим полным автоматическим самовосстановлением.

Нетрудно догадаться, что требуется для получения такого же эффекта в современных энергосистемах любой структуры. Это рассматривается ниже.

2. Устойчивость в современных энергосистемах.

Современные энергосистемы, имеющие сложную конфигурацию сети, соединены между собой несколькими связями. Отключение одной из них с учетом принципа (п-1) к развалу не приводит даже в случае устойчивого повреждения одного элемента. Однако риски, допускаемые в управлении нормальными режимами, или последующее отключение дополнительных связей, при которых не успевают подготовить режим для изменившихся условий, чреват развалом.

Анализ более 30-ти развалов и тяжелых аварий, упомянутых в табл. 1, показал, что в большинстве случаев причиной возникших развалов и тяжелых аварий в

энергосистемах являются пять вторичных аварийных процессов, следующих за начальным аварийным возмущением. Эти процессы приведены в табл. 2.

Задача заключается в том, чтобы подобрать по возможности единообразное решение для устранения вторичных аварийных процессов. Для этого необходимо рассмотреть их варианты.

Из рассмотренного в табл. 2 следует, что для первого случая имеется решение. В остальных случаях развал является результатом перегрузки сети, что приводит к аварийным процессам. Для предотвращения нарушений устойчивости в качестве существенного элемента аварий необходимо быстрое действие порядка 200 мсек. Как известно, для этого используются различные методы разгрузки турбин с помощью системы каналов [4] или локальным сравнением в тепле реального времени соответствия мощности турбины и генератора (over speed protection) [5].

При сетевых лавинах напряжения она происходит из-за квадратичной зависимости роста потерь реактивной мощности от передаваемой активной составляющей в перегруженной сети [6]. При этом напряжение снижается из-за роста продольной составляющей потери напряжения, пропорциональной повысившемуся потоку реактивной мощности. На это реагируют регуляторы возбуждения генераторов, которые, перегружаясь реактивной мощностью, массово отключаются защитами от внешних повреждений в качестве феномена неустойчивости системы «сеть-генераторы».

При перегрузке и понижениях напря-

Табл. 2. Вторичные процессы при развалах энергосистем

	Характер процесса	Причины вторичных лавинных процессов
1	Нарушения динамической устойчивости при коротких замыканиях	Устраняются имеющимися в энергосистемах мгновенными защитами питающих сетей, включая отказы выключателей
2	То же при отключении сильно загруженных линий	Проявляется как перегрузка сети
3	Нарушения статической устойчивости	Перегрузка сети
4	Лавины напряжения с массовым отключением генераторов	Перегрузка сети
5	Множественные отключения линий из-за замыканий на землю при увеличении провесов проводов	Перегрузка сети



жения линии массово отключаются с выдержками 2-3 секунды резервными зонами дистанционных защит, воспринимающих ситуации как короткие замыкания.

На не отключившихся линиях при перегрузке сети увеличиваются провесы проводов, что снижает габариты по отношению к земле на трассах. При этом возникают множественные отключения линий из-за замыканий на землю, причем эти повреждения устойчивы.

3. Требования, предъявляемые к средствам защиты в современных энергосистемах.

Учитывая невозможность участия персонала в ходе начавшегося процесса развала энергосистемы, процесс должен развиваться, используя внутренние возможности с помощью приспособленной для этих целей автоматики. Действия защиты должны быть понятны персоналу, что существенно облегчает внедрение.

Сечения сети, которые могут перегреться (опасные сечения), обычно известны, и в нормальных режимах они подвергаются контролю. Однако в аварийных ситуациях контроль теряется. Для таких сечений должна быть создана система защиты регионально-централизованного характера.

Она должна выполнять следующие функции [7]:

- 1) выявлять ожидаемую перегрузку линий;
- 2) эффективно устранять перегрузки при их возникновении;
- 3) ликвидировать дефицит мощности в приемной части энергосистемы;
- 4) автоматически восстановить целостность энергосистемы;
- 5) автоматически включить отключенные в процессе разгрузки потребительские линии.

Пункты 3-5 соответствуют перечисленному перечню мероприятий в разделе 2. На этом, в соответствии с упомянутым в гл. 2, процесс самовосстановления завершается примерно за 100 секунд. Аварийный процесс по существу сопровождается быстрым переходным процессом, оставаясь для внешнего наблюдателя практически незамеченным.

4. Система защиты.

В качестве массива исходной информации используются данные исходного нормального режима на основе математи-

ческой модели M_1 , сопровождающей режим энергосистемы в реальном времени.

Важную роль должна выполнять дополнительная математическая модель M_2 , работающая в циклическом режиме и осуществляющая мониторинг надежности, выявляющая опасности отключения дополнительных элементов. Подобные модели имеются, и они должны работать в режиме автоматического счета на основе информации нормального режима и сигналов об отключении элемента, вызвавшего начальное возмущение.

Срабатывание должно происходить по признаку возникновения особого события, например, отключения загруженной линии сверх обусловленного принципом (п-1), при котором на основе данных нормального режима (M_1) и (M_2) возникнет перегрузка линий. Действие защиты по этим признакам запускает логические сигналы для воздействия по нужным адресам. Структура подобной системы практически совпадает с применяемой для одного из частных случаев – защиты от нарушения динамической устойчивости.

5. Устранение перегрузки сети.

Перегрузка сети может рассматриваться как локальный дефицит мощности, который внешне явно не проявляется из-за единства энергосистемы. Разгрузку перегружившейся сети на первый взгляд можно было бы осуществить централизованным отключением нагрузки в приемной части энергосистемы. Для этого нужен разветвленный централизованный быстродействующий канал отключения нагрузки, который, по существу, дублирует имеющуюся систему разгрузки, реагирующую на явное проявление дефицита. Нагрузки находятся в узлах, в то время как их отключением нужно разгрузить связи. Между нагрузками в узлах и потоками в линиях существуют связи, которые устанавливаются коэффициентами распределения, которые зависят от топологии сети. Так, например, отключение пятой нагрузки по отношению к первой связи может иметь коэффициент $\alpha_{51}=0,5$, а по отношению к третьей связи $\alpha_{53}=0,7$. Для пятидесяти нагрузок и пяти связей приходится иметь дело с 250 коэффициентами. В реальном времени нужно мгновенно осуществлять выбор зоны, в пределах которой отключа-

ется большое количество конкретных постоянно измеряющихся нагрузок.

Иногда используется разгрузка по признаку понижения напряжения. Она не является аналогом частотной разгрузки, так как из-за отсутствия инерционности процесса не обеспечивает сочетания быстрого действия с селективностью. При соблюдении требования быстрого действия сразу отключаются все очереди, а при соблюдении селективности, которая обеспечивается лишь выдержками времени, нет быстрого действия. В обоих случаях нет уверенности, что отключаемой нагрузки хватит, так как процесс не имеет обратной связи и исключает возможность саморегуляции, что приводит в значительной мере к действию «наобум».

Иное дело – применение секционирования. В этом случае достигается мгновенная разгрузка сети и дефицит проявляется явно. На него реагирует специально для этой цели имеющаяся частотная разгрузка, которая тем самым включается в дело, реагируя на кратковременное снижение частоты в результате наброса мощности. Частично наброс устраняется вращающимся резервом этой части энергосистемы, а частично работой комплексной частотной разгрузки.

Правда, при применении разделения энергосистемы приходится преодолевать предрассудок, в соответствии с которым этот способ применяется лишь в крайнем случае. На самом деле это не является чем-то особенным. Он давно используется для прекращения асинхронных режимов.

В США разделение энергосистемы в процессе развала рассматривается как средство сохранения в работе хотя бы части генерирующих источников для последующего, более быстрого восстановления в послеаварийном режиме вручную. Важное требование заключается в том, чтобы при разделении все линии опасного сечения отключались одновременно, так как при каскадном их отключении происходит нарастание перегрузки еще не отключившихся линий, что неизбежно приводит к нарушениям устойчивости с последующими развалами, что неоднократно имело место в авариях (табл. 1).



Екабс Барканс

Эмеритированный (за-служенный) профессор, реабилитированный доктор технических наук. Защитил ученую степень кандидата технических наук в 1963 году. Степень доктора технических наук — в 1974 году в Институте энергетики АН СССР в Москве. В период 1960–1979 гг. работал главным диспетчером энергосистемы и одновременно доцентом Рижского Политехнического института (РПИ). С 1980 года профессор факультета энергетики и электротехники Рижского Технического университета (РТУ). Лауреат государственной премии Республики за 1970 год и Годовой премии за вклад в научную деятельность в 2004 году. Научная работа — в областях управления и автоматизации энергосистем, защиты энергосистем от развалов и создания процессов их самовосстановления, исследований режимов напряжения и реактивной мощности энергосистем, рационального использования энергии, закономерностей водотоков рек мира за длительные периоды, проблемы изменения климата Земли. Автор более 200 опубликованных научных трудов, 20-ти монографий и учебников, 73-х авторских свидетельств и патентов.

Важно понимать, что комплексная разгрузка {(АЧР-1)+(АЧР-2)} представляет из себя систему с обратной связью, обеспечивающей точность действия, при котором благодаря селективности отключается ровно столько нагрузок, сколько бывает нужным.

Требования к выбору места кратковременного секционирования не слишком строгие. Если секционирование осуществлять в сечении перегруженных линий, то объем разгрузки максимален. Так, в некоторых случаях развалов разделения происходили в сечениях, через которые протекало 6–8 ГВт (табл. 1, случаи 24; 28). Однако секционирование можно проводить не на самих перегрузившихся линиях, а на последующих участках сети. При этом эти линии остаются в работе с допустимыми нагрузками и объем разгрузки существенно снижается.

В крупных энергосистемах разделения энергосистемы в опасных сечениях приводит к относительно небольшим дефицитам — порядка 5%, и процессы протекают сравнительно легко.

После секционирования и произошедшей разгрузки, с учетом того, что большинство отключившихся линий сохраняют работоспособность, а разность частот меньше 0,2 Гц, процесс завершается автоматическим восстановлением единства энергосистемы при помощи одновременного включения всех отделившихся линий.

Наиболее тяжелым и трудно оцениваемым случаем, разумеется, является отключение систем шин. Однако и в этом случае, при наличии быстродействующего УРОВ, разгрузка перегрузившихся линий путем секционирования может существенно уменьшить последствия.

Эффективность секционирования очевидна применительно к нарушениям статической устойчивости, лавинам напряжения и множественным отключениям линий из-за действия резервных зон защит или увеличения провесов проводов. Исходя из соображений унификации средств управления, целесообразно оценить эффективность разделения и как средства предотвращения нарушения динамической устойчивости, преследуя цель сброса нагрузки турбин, что эквивалентно классическому решению. Учитывая преимущество унификации средств управления, это тоже приемлемо.

Проверки эффективности рассматриваемых средств, применительно к авариям, приведенным в табл. 1, свидетельствуют, что в большинстве случаев подобным образом можно было бы избежать тяжелых последствий.

Более подробно вопросы защиты энергосистем от развалов рассмотрены в книге на английском [7], доступной в Интернете.

Выводы

1. В основе соображений о возможной защите энергосистем от развалов использован длительный опыт, обеспечивавший быстрое самовосстановление режима без участия персонала при возникавших тяжелых авариях. При этом процесс сводился к переходным процессам, завершившихся за 100 секунд без участия персонала и остававшихся для большинства потребителей незаметными.
2. Установлено, что основной причиной развалов является перегрузка сети, для быстрой разгрузки которой целесообразно использовать кратковременное секционирование.
3. Для обеспечения самовосстановления в современных энергосистемах на участках сети, которые могут подвергаться перегрузкам, необходимы регионально-централизованные защиты, действующие с помощью быстродействующих каналов, передающих адресные логические сигналы для одновременных операций секционирования линий на основе их ожидаемой перегрузки.
4. За этим следует действие разгрузки в приемной части энергосистемы, восстанавливающей частоту до номинального значения, и, с учетом сохранения работоспособности отключившихся до аварии линий, при малой разности частот, секционирующие линии включаются, восстанавливая целостность энергосистемы. Затем, в завершение аварии, по признаку существования нормальной частоты после ее восстановления, в течение 15–20 секунд происходит включение отключенных потребителей.
5. Самовосстановление в большинстве случаев преобразует развал в переходный процесс, возвращающий энергосистему в нормальный режим за время порядка 100 секунд, который в большинстве случаев для большинства потребителей остается практически незаметным.

Литература:

1. Баркан Я., Маркушевич Н., Рудзитис Р., Голубев В. Частотная разгрузка как средство ликвидации системных аварий. – Электрические станции, 1966. с. 74.
2. Баркан Я., Иванов В. Граничные траектории для успешной синхронизации энергосистем в послеаварийном режиме// Материалы IX Всесоюзной научной конференции по моделированию энергосистем. Известия АН Латвийской ССР, 1988. - №5. – с. 107.
3. Баркан Я., Орехов Л. Автоматизация энергосистем. Москва: Высшая школа, 1981. 271 с.
4. Иофьев Б.И., Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. Москва: Энергия, 1974. – 416 с.
5. National electricity company limited. Power system incident Australia 14. march 2005. Final report. 26 august 2005.
6. Баркан Я. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности. Москва. Энергоатомиздат, 1954. –160 с.
7. Jekabs Barkans, Diana Zalostiba. Protection against blackouts and self-restoration of power systems/ Riga 2009, RTU Publishing House 141 pp. Интернет rtu.eef.lv