

## **Опыт эксплуатации автоматических систем компенсации емкостного тока замыкания на землю**

Кричко В.А., Миронов И.А. (Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС»- «Фирма ОРГРЭС», г.Москва)

В «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» [1] четко прописаны основные требования к режимам заземления нейтрали сетей 6-35 кВ через дугогасящие реакторы. Так в п.5.11.10 ПТЭ сказано:

*«Дугогасящие аппараты должны иметь резонансную настройку.*

*Допускается настройка с перекомпенсацией, при которой реактивная составляющая тока замыкания на землю должна быть не более 5А, а степень расстройки – не более 5 %. Если установленные в сетях 6-20 кВ дугогасящие реакторы имеют большую разность токов смежных ответвлений, допускается настройка с реактивной составляющей тока замыкания на землю не более 10 А. В сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю менее 15А допускается степень расстройки не более 10%.*

*Работа с недокомпенсацией емкостного тока, как правило, не допускается. Разрешается применение настройки с недокомпенсацией лишь временно при отсутствии дугогасящих реакторов необходимой мощности и при условии, что аварийно возникающие несимметрии емкостей фаз не могут привести к появлению напряжения смещения нейтрали, превышающего 70% фазного напряжения.»*

А в п.5.11.12 ПТЭ сказано, что: *«В сетях 6-10 кВ, как правило, должны применяться плавнорегулируемые дугогасящие реакторы с автоматической настройкой компенсации.*

*При применении дугогасящих реакторов с ручным регулированием тока показатели настройки должны определяться по измерителю расстройки компенсации. Если такой прибор отсутствует, показатели настройки должны выбираться на основании результатов измерений тока замыкания на землю, емкостных токов, тока компенсации с учетом напряжения смещения нейтрали.»*

В 2004-2005г.г. ОРГРЭС провел опрос около 50 энергосистем России на предмет уровня оснащённости сетей 6-35 кВ дугогасящими реакторами. На основании данных из 43 энергосистем России, собранных ОРГРЭС суммарное количество сетей (секций) 6-35 кВ на начало 2005г. в данных энергосистемах составило 25264 штук. Следует отметить, что в данном статистическом исследовании данные энергосистем Москвы и Санкт-Петербурга не рассматривались ввиду их особой специфики.

Общее количество сетей, в которых согласно п.5.11.8 ПТЭ необходимо применять компенсацию емкостного тока, составило 2632 штук (т.е. около 10,4% от общего числа сетей). Причем в этих сетях установлено 2419 дугогасящих реакторов, что составляет 91,9% от общей потребности в них.

По данным ОРГРЭС в России в сетях 6-35 кВ с компенсацией емкостного тока применяется 1986 ступенчатых дугогасящих реакторов (75,5% от общего числа ДГР) и 433 плавнорегулируемых реакторов (24,5%).

То, что почти  $\frac{3}{4}$  установленных на сегодняшний день дугогасящих реакторов составляют ступенчатые ДГР, объясняет тот факт, что в п.5.11.10 ПТЭ до сих пор допускаются такие «странные» расстройки компенсации. Вернее тем, что почти 95% ступенчатых реакторов – это реакторы типа ЗРОМ или РЗДСОМ, которые на протяжении последних 50 лет выпускались по устаревшим ТУ, в которых было предусмотрено

только 5 ответвлений. В то время, как например, в Германии еще 50-е годы прошлого столетия ступенчатые дугогасящие реакторы выпускались с 16 отпайками.

Большинство плавнорегулируемых реакторов (403шт. или ~93,1%) составляют плунжерные реакторы типа РЗДПОМ (производства ПК «ХК Электрозавод», ЦРМЗ «Мосэнерго» и др. энергоремонтные з-ды) или аналогичные западного производства (ZTC, GEUF и т.п.).

Автоматическими регуляторами оснащены (находятся в работоспособном состоянии) 223 плавнорегулируемых реактора, что составляет 51,5% от потребности.

Этот факт объясняется тем, что до последнего времени плунжерные реакторы типа РЗДПОМ не комплектовались автоматическими регуляторами на заводе-изготовителе. На сегодняшний день этот недостаток преодолен и все дугогасящие реакторы типа РЗДПОМ, поступающие в эксплуатацию, комплектуются автоматическими микроконтроллерными регуляторами МИРК-4 (ООО «МиКрО-Инжиниринг», г.Москва).

Как показывает практика, многие из установленных на плунжерных ДГР автоматических регуляторов (РНДК, БАНК, БАРК, УАРК и т.п.) проработали по 20-30 лет, выполнены на устаревшей элементной базе и зачастую представляют собой единичные опытные (а не серийные) экземпляры устройств. Поэтому реально уровень автоматизации плунжерных дугогасящих реакторов намного ниже 50%. Поэтому для замены устаревших автоматических регуляторов можно также предложить новые микроконтроллерные регуляторы МИРК-4.

Чуть менее 7% от обследованных плавнорегулируемых реакторов - это дугогасящие реакторы с подмагничиванием (РДП, КДР, РУОМ, РЗДУОМ).

Как показывает опыт эксплуатации, внедрение дугогасящих реакторов с подмагничиванием типа РЗДУОМ (СКТБ «Энергоремонт») или РУОМ, РОУ (Раменский з-д «Энергия») обходится в 2,5-3 раза дороже внедрения аналогичного по мощности плунжерного дугогасящего реактора типа РЗДПОМ.

Первые образцы дугогасящих реакторов с подмагничиванием (типа КДР или РДП) были установлены ещё в начале 70-х годов прошлого столетия. Однако все они управляются в ручном режиме, и до сих пор ни на одном образце реактора с подмагничиванием типа КДР или РДП не установлено ни одного автоматического регулятора (за исключением нескольких образцов, установленных в сетях 6-10 кВ целлюлозно-бумажных комбинатов, на которых применено ступенчатое регулирование тока компенсации).

Как показала практика эксплуатации дугогасящих реакторов с подмагничиванием, основной их проблемой является отсутствие правильно и надежно работающих систем автоматического управления. За время с первых попыток создания автоматических систем управления ДГР с подмагничиванием [2-4] были перепробованы все известные принципы регулирования (амплитудный, фазовый, ШИМ-модуляции, промышленной частоты и т.п.). Однако, на сегодняшний день, ни один из них не дал искомым результатов.

В то время как у плунжерных дугогасящих реакторов принципы автоматического управления остаются неизменными на протяжении последних 50 лет, изменялась только элементная база регуляторов. Особо следует подчеркнуть полное отсутствие в современных публикациях (в отличие от плунжерных реакторов) о дугогасящих реакторах с подмагничиванием экспериментальных осциллограмм дуговых и металлических замыканий на землю. При наличии таких осциллограмм все заинтересованные специалисты сами бы смогли оценить реальные, а не декларируемые параметры реак-

торов с подмагничиванием - нелинейность вольт-амперной характеристики, процент гармоник в токе компенсации, время выхода на резонансную настройку и т.п.

На рис.1 приведена осциллограмма металлического замыкания в сети 10 кВ ПС №94 ММК со ступенчатым дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ. Как видно из осциллограммы, ток компенсации ступенчатого ДГР устанавливается практически через два периода промышленной частоты. За счет линейности вольт-амперной характеристики (рис.2), ток компенсации при ОЗЗ аналогично устанавливается за 1,5-2 периода и у плунжерного ДГР.

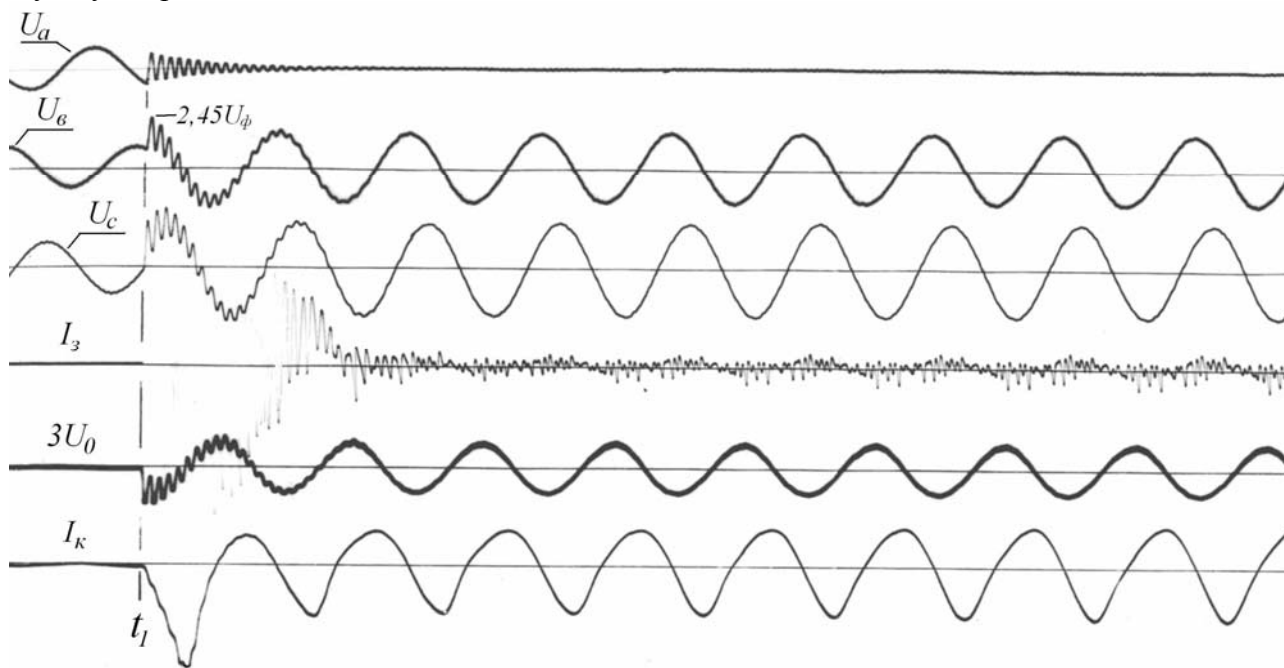


Рис.1. Возникновение ОЗЗ в сети 10 кВ ПС №94 ММК с дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ.

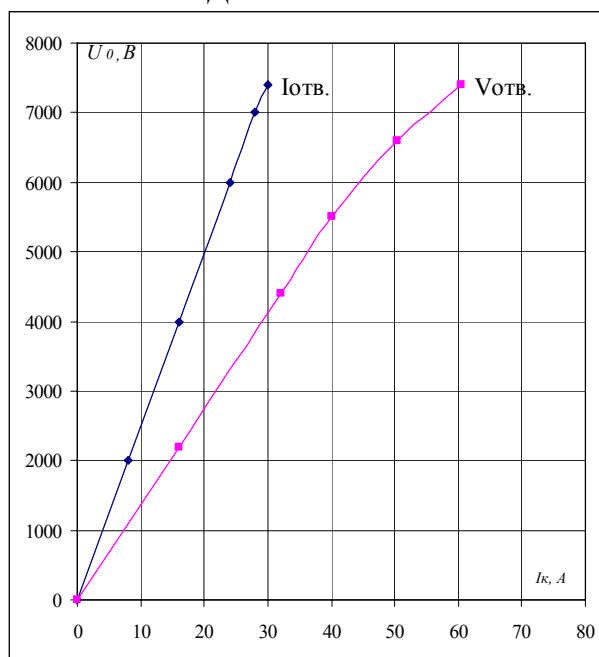


Рис.2. Вольт-амперная характеристика плунжерного дугогасящего реактора РЗДПОМ-480/10 кВ.

На рис.3 приведено отключение металлического ОЗЗ в сети 10 кВ ПС №94 ММК с дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ.

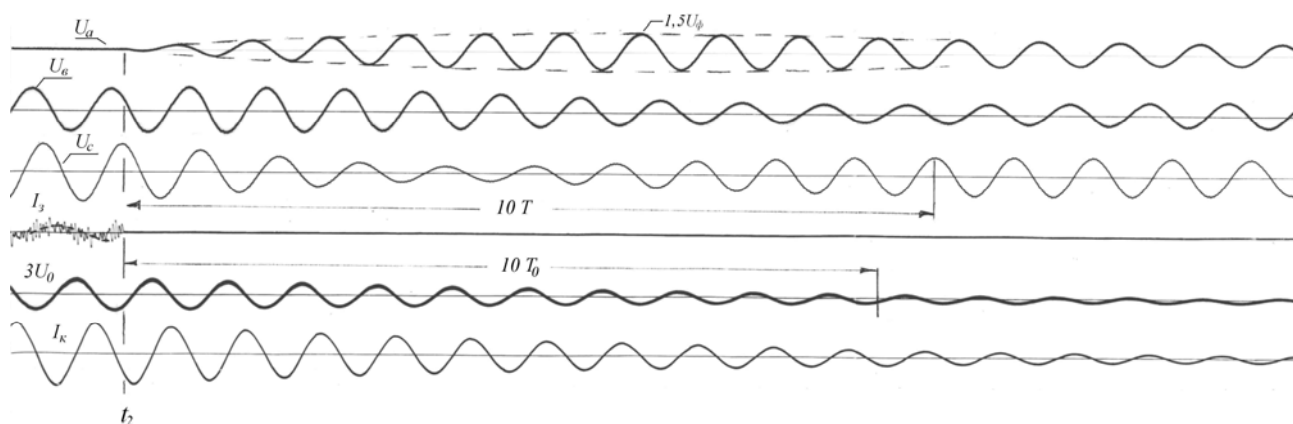


Рис.3. Отключение ОЗЗ в сети 10 кВ ПС №94 ММК с дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ.

Из осциллограммы рис.3 по соотношению частоты собственных колебаний напряжения на нейтрали  $3U_0$  после отключения ОЗЗ и промышленной частоты можно определить степень расстройки компенсации (по 10 периодам) [5]:

$$\nu = 1 - \left( \frac{f_0}{f} \right)^2 = 1 - \left( \frac{nT}{nT_0} \right)^2 = -0,16$$

Как показали результаты обследования, в случае эксплуатации в качестве плавнорегулируемого реактора с подмагничиванием типа РУОМ (РЗДУОМ, РОУ) энергопредприятия постоянно сталкиваются с определенными трудностями в автоматическом управлении данными реакторами. По состоянию на конец 2005г. из 30 обследованных реакторов с подмагничиванием с автоматическими регуляторами (РУОМ, РЗДУОМ, РОУ) только 7 постоянно работают в автоматическом режиме. На остальных реакторах с подмагничиванием автоматика представляет собой или опытные образцы, которые до конца не введены в работу, или выведена эксплуатацией из работы по причине её частых сбоев.

Анализ принципов автоматического управления реакторами с подмагничиванием, показал, что в большинстве образцов регуляторов заложен неверный подход. Так, например, в реакторах типа РУОМ в нормальном режиме работы обмотка подмагничивания не обтекается током, а его индуктивность составляет какое-то минимальное базовое значение и не совпадает с емкостным сопротивлением сети. При возникновении металлического замыкания на землю автоматика за счет форсированного увеличения тока подмагничивания подстраивает индуктивность РУОМ в резонанс с емкостью сети. Ввиду инерционности насыщения магнитной системы реактора с подмагничиванием это происходит за 10-15 периодов промышленной частоты. В качестве примера на рис.4 приведено дуговое замыкание в сети 10 кВ ПС №94 ММК со ступенчатым дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10 кВ, а на рис.5 дуговое замыкание на землю в сети 6 кВ Вологодской ТЭЦ с плунжерным дугогасящим реактором РЗДПОМ-300/6кВ и автоматическим регулятором МИРК-3М.

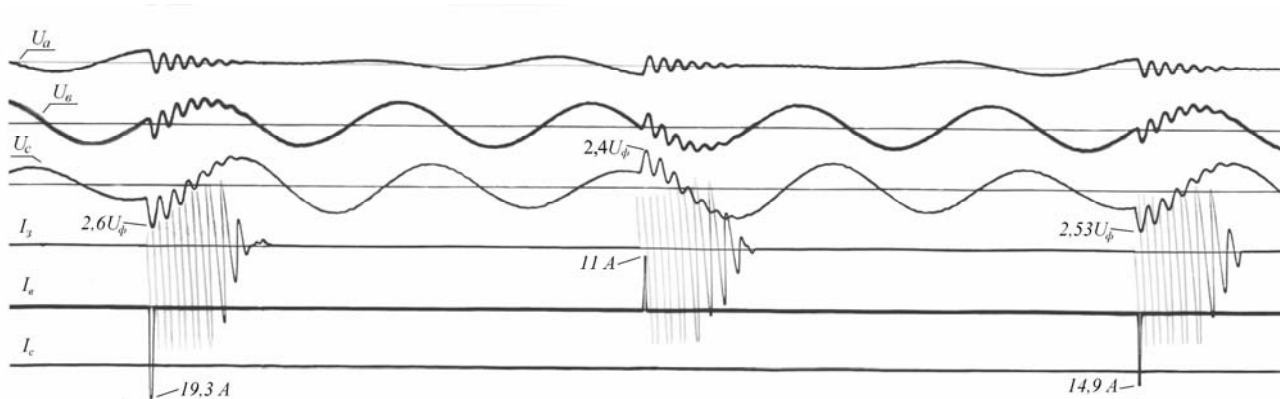


Рис.4. Дуговое замыкание на землю в сети 10 кВ ПС №94 ММК со ступенчатым дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10 кВ.

Из осциллограммы рис.3 видно, что повторные зажигания дуги в сети с расстройкой компенсации  $\nu = -16\%$  происходят с частотой в 2,5 периода. Максимальные перенапряжения при этом составляют  $2,6 U_{\phi}$ .

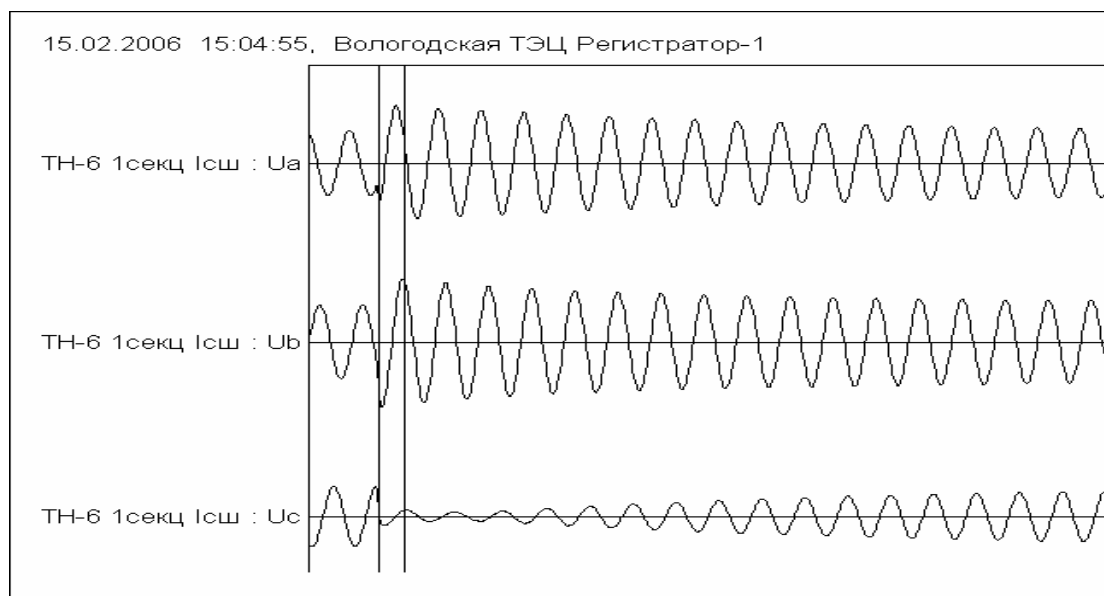


Рис.5. Дуговое замыкание на землю в сети 6 кВ Вологодской ТЭЦ с плунжерным дугогасящим реактором РЗДПОМ-300/6кВ

Как видно из осциллограммы рис.5 при резонансной настройке РЗДПОМ-300/6кВ в сети 6 кВ Вологодской ТЭЦ произошло погасание единичного «клепка» и повторных пробоев в дальнейшем не возникало. Это объясняется тем, что за счет резонансной настройки напряжение на поврежденной фазе восстанавливается очень медленно ( $\sim 25$  периодов промышленной частоты) и за это время успела произойти полная деионизация в месте повреждения.

При дуговых замыканиях автоматика ДГР с подмагничиванием (из-за инерционности выхода на рабочий режим) блокирует его работу. Следовательно, РУОМ при дуговом замыкании работает как обычный ступенчатый реактор с очень большой расстройкой компенсации ( $\sim 30\div 40\%$ ). Т.е. для реакторов с подмагничиванием теряется смысл самого названия «дугогасящий», так как при такой расстройке компенсации ду-

говое замыкание может происходить каждый полупериод. И существует большая вероятность того, что за счет эскалации перенапряжений произойдет пробой на другой фазе и возникнет КЗ раньше, чем на поврежденной фазе дуговое замыкание перейдет в металлическое.

Автоматические регуляторы реакторов типа РЗДУОМ настраивают ДГР с подмагничиванием в нормальном режиме работы сети. Основная проблема заключается в том, что в них заложен принцип регулирования по амплитудно-фазовым характеристикам конура нулевой последовательности. Хорошо известно, что реакторы с подмагничиванием имеют нелинейную зависимости тока компенсации от тока подмагничивания  $I_k=f(I_n)$  (рис.6), а также нелинейную вольт-амперную характеристику  $U=f(I_k)$ (рис.7) в начальной части в районе  $0,05-0,15U_\phi$  и в районе  $0,9-1,1U_\phi$ .

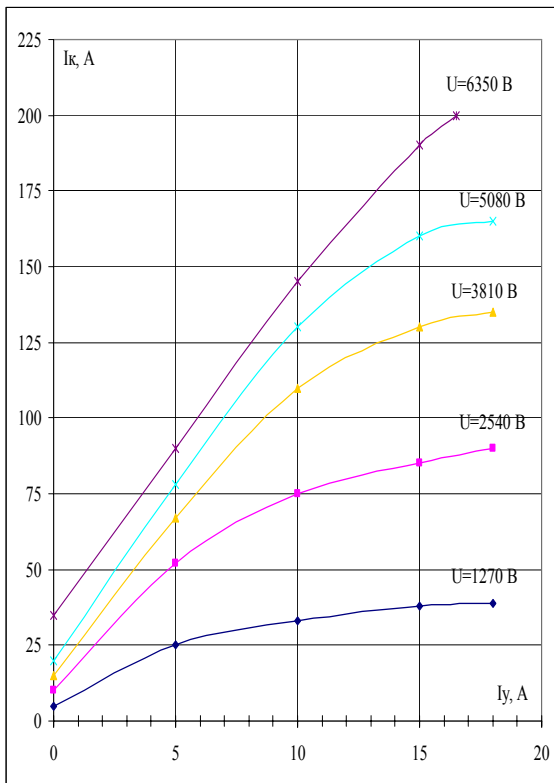


Рис.5. Зависимость тока компенсации от тока подмагничивания  $I_k=f(I_n)$  дугогасящего реактора с подмагничиванием РЗДУОМ( РЗДПОМ)-1000/10 кВ для разных напряжений на реакторе.

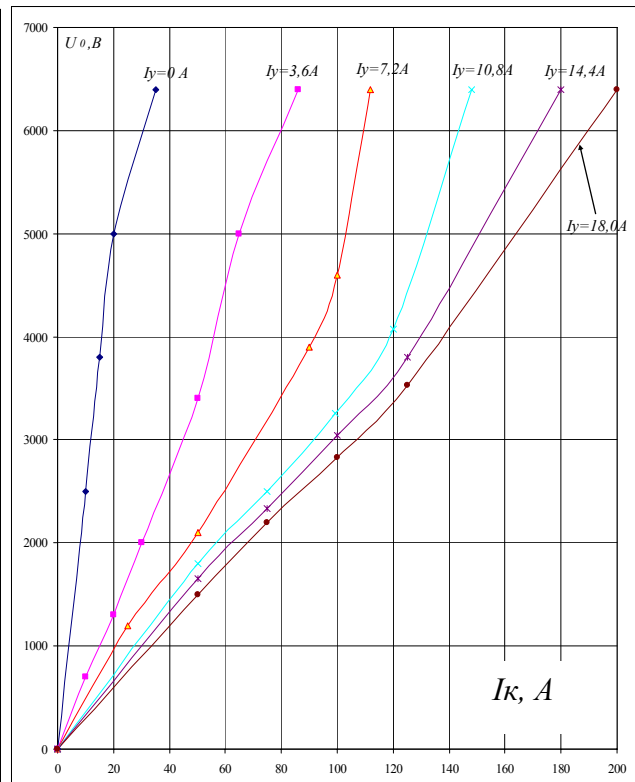


Рис.7. Вольт-амперные характеристики  $U=f(I_k)$  дугогасящего реактора с подмагничиванием РЗДУОМ( РЗДПОМ)-1000/10 кВ для различных токов подмагничивания.

Поэтому регуляторы, использующие фазовый принцип работы, неприменимы для реакторов с подмагничиванием, а могут применяться только для плунжерных реакторов, обладающих достаточной линейностью ВАХ.

Также довольно серьезной проблемой реакторов с подмагничиванием является их вклад в ток замыкания довольно значительной составляющей токов высших гармоник, которая может составлять до 10-15% от емкостного тока. Этот факт, а также увеличенные активные потери при максимальных токах подмагничивания, создают условия для длительного горения заземляющих дуг. А при металлическом замыкании на землю (даже в случае резонансной настройки) остаточный ток в месте замыкания (ак-

тивная составляющая + высшие гармоники) имеет довольно значительную величину, что сводит на нет все преимущества компенсации емкостного тока.

Следует также отметить, что за рубежом дугогасящие реакторы с подмагничиванием не нашли применения по причине их большой стоимости по сравнению с плунжерными реакторами.

### Совместное использование ступенчатых и плунжерных дугогасящих реакторов

Как уже отмечалось выше, компенсация емкостного тока не внедрена примерно в 10% сетей от общего количества сетей, в которых она требуется. В многочисленных статьях, опубликованных в последнее время по этому вопросу, отмечается также тот факт, что в сетях с компенсацией емкостного тока зачастую уже не хватает мощности установленных дугогасящих реакторов. И на этом основании предлагается вообще отказаться от компенсации емкостного тока (!?). Но, как указывалось выше в п.5.11.10 ПТЭ, разрешается временная работа с недокомпенсацией, при отсутствии дугогасящих реакторов необходимой мощности. И решение этого вопроса в последние 15-20 лет скорее лежало не в технической, а экономической области.

Сегодня в энергосистемах идет планомерное постепенное внедрение плунжерных дугогасящих реакторов необходимой мощности, с учетом перспективного развития сетей. Для подстанций, на которых ранее были установлены ступенчатые дугогасящие реакторы, рядом проектных институтов разработан и внедряется способ параллельной установки ступенчатого и плунжерного реакторов с автоматическим регулированием (рис.8).

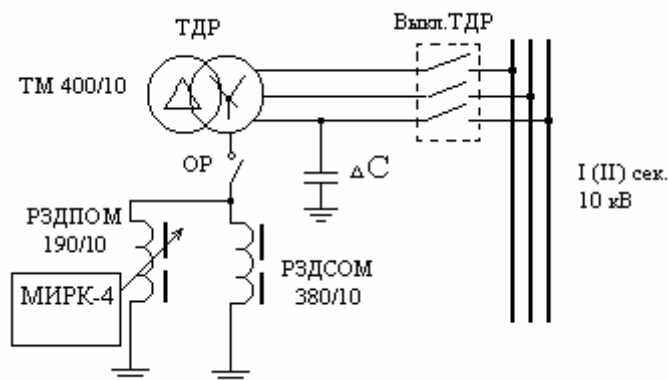


Рис.8. Схема параллельного подключения ступенчатого и плунжерного дугогасящих реакторов в сетях 6-10 кВ

В зависимости от режимов в конкретной сети в качестве добавочного плавнорегулируемого реактора могут быть предложены РЗДПОМ-190/10 (пределы регулирования тока компенсации 5-25 А), РЗДПОМ-480/10(12-63 А) или РЗДПОМ-760/10(30-130 А).

### Совместное использование дугогасящих реакторов и резисторов в нейтрали.

Этот способ был предложен авторами [5,7] и в последнее время также успешно внедряется. Однако эффективность данного способа может быть снижена из-за неправильного выбора дугогасящего реактора и резистора. Наиболее правильным решением является установка плунжерного дугогасящего реактора с автоматическим настройкой в резонанс (рис.9).

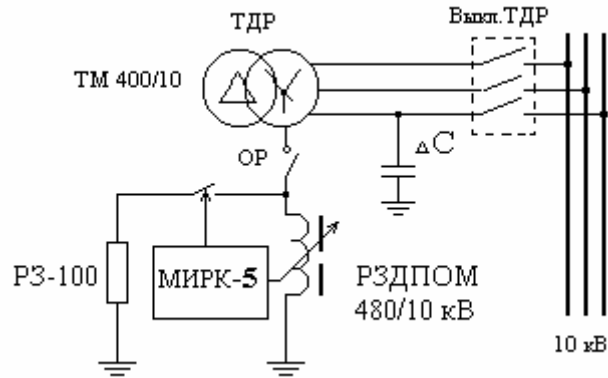


Рис.9. Схема подключения дугогасящего реактора типа РЗДПОМ и высоковольтного резистора.

Тогда при дуговых замыканиях на землю будут проявляться все положительные стороны резонансной настройки компенсации емкостных токов [6]:

- снижение перенапряжений до безопасных для изоляции значений  $2,2-2,4 U_{\phi}$ ;
- надежное гашение заземляющей дуги;
- снижение скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе.

При металлическом замыкании на землю параллельно дугогасящему реактору подключается резистор на время достаточное для срабатывания защиты от замыкания на землю.

В случае применения параллельного включения ступенчатого ДГР и резистора эффективность компенсации емкостного тока резко падает, т.к. основной упор делается на резистор и селективную работу защит от ОЗЗ, и соответственно, не ведется настройка компенсации.

Применение параллельного включения дугогасящего реактора с подмагничиванием и резистора представляется вообще нецелесообразным. Как было показано выше, автоматика ДГР с подмагничиванием при дуговых замыканиях блокируется, а при металлическом ОЗЗ начинает подстраивать ток компенсации к резонансному значению. Из-за возникающих при этом на нейтрали сети колебаний защиты от ОЗЗ будут работать неселективно, и, соответственно, пропадет весь эффект от внедрения резистора.

### Внедрение современных дугогасящих реакторов

Во многих европейских странах с резонансным заземлением нейтрали (Германия, Чехия, Австрия, Словакия, Венгрия, Италия) применяется очень интересное решение – совместное использование ДГР и резистора. В сетях среднего напряжения этих стран эксплуатируются ДГР со специальной вторичной обмоткой, к которой может быть подключен низковольтный резистор. При дуговых замыканиях на землю проявляются все положительные стороны компенсации емкостных токов, то есть настроенная автоматикой в резонанс ДГР снижает перенапряжения до приемлемого с точки зрения эксплуатации уровня. При металлическом замыкании на землю к специальной дополнительной обмотке дугогасящего реактора подключается резистор на время достаточное для срабатывания защит от замыкания на землю.

К этому типу ДГР относятся плунжерные дугогасящие реакторы типа ASR(ZTC) фирмы EGE (Чехия). Для управления таким реактором может применяться микроконтроллерный регулятор МИРК-5 (ООО «Микро-Инжиниринг», Россия) [7].



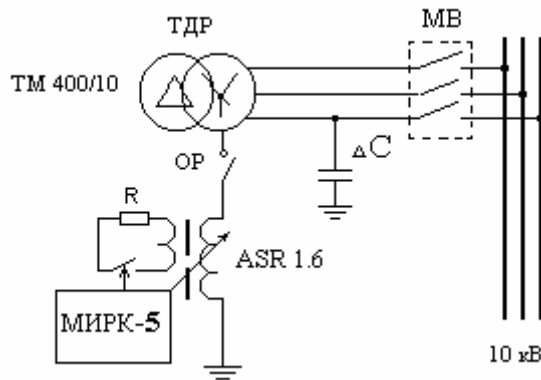


Рис. 10. Схема подключения резистора с «низкой» стороны (применение дугогасящего реактора типа ASR фирмы EGE)

### **Внедрение современных микроконтроллерных регуляторов для автоматической настройки плунжерных дугогасящих реакторов.**

Для автоматической настройки плунжерных дугогасящих реакторов ООО «МиКрО-Инжиниринг» (г.Москва) разработан микроконтроллерный автоматический регулятор МИРК-4 (взамен регулятора МИРК-3, выпускавшегося более 10 лет). В соответствии с ТУ 3425-001-40093098-2005 ООО «МиКрО-Инжиниринг» изготавливает также шкаф управления плунжерными реакторами типа РЗДПОМ с встроенным регулятором МИРК-4.

Микроконтроллерный регулятор МИРК-4 за счет использования современного микроконтроллера и цифровой обработки входных сигналов обладает большей чувствительностью и помехозащищенностью, чем старые регуляторы типа УАРК, РНДК, БАНК и др. Одновременное определение резонансной настройки по амплитуде и фазе напряжения смещения нейтрали полностью исключает ложное срабатывания регулятора. Цифровая обработка сигналов позволяет очень точно производить все необходимые регулировки (зоны нечувствительности, задержки срабатывания и т.д.).

Наличие в МИРК-4 дополнительного порта (*USB*) позволяет оперативно получать информацию о степени расстройки компенсации, срабатывании ДГР, времени возникновения замыкания на землю и токе компенсации ДГР, которая записывается в файл журнала событий и может передаваться на компьютер диспетчера.

Для управления ДГР со специальной вторичной обмоткой, к которой может быть подключен низковольтный резистор (типа ASR фирмы EGE, Чехия) ООО «МиКрО-Инжиниринг» разработал регулятор МИРК-5.

В настоящее время в энергосистемы России и СНГ поставлено и эксплуатируется сроком до 10 лет около 200 штук регуляторов МИРК-3 и МИРК-4.

### **Выводы**

1. В электрических сетях 6-35 кВ, в которых согласно п.5.11.8 ПТЭ необходима компенсация емкостного тока замыкания на землю, наиболее целесообразно применять плунжерные дугогасящие реакторы с автоматической настройкой в резонанс.

2. Не рекомендуется внедрение в сетях 6-35 кВ дугогасящих реакторов с подмагничиванием ввиду недоработанности их автоматических регуляторов (не обеспечивают резонансную настройку) и плохих метрологических характеристик самих реакто-

ров с подмагничиванием (большие активные потери на максимальных токах подмагничивания, большой процент высших гармоник в токе компенсации).

3. Для автоматической настройки в резонанс плунжерных дугогасящих реакторов целесообразно применять современные микроконтроллерные автоматические регуляторы типа МИРК-4 и МИРК-5 (ООО «МиКрО-Инжиниринг», г.Москва).

4. Для «резистивно-индуктивного» способа заземления нейтрали сетей 6-35 кВ необходимо применять только плунжерные дугогасящие реакторы. Применение совместно с резистором ступенчатых ДГР и дугогасящих реакторов с подмагничиванием на порядок менее эффективно.

### **Литература**

1. «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», СПО ОРГРЭС, Москва, 2003 г. (введены в действие с 30 июня 2003г.)

2. К.Д. Вольпов, Л.И. Дорожко, М.С. Либкинд, Г.И. Тарасов, «Экспериментальные исследования дугогасящей катушки нового типа», «Электрические станции», 1969г., №9.

3. С.Б. Белло, О.А. Петров, В.И. Пястолов, «Опыт эксплуатации автоматического компенсирующего устройства», «Электрические станции», 1971г., №8.

4. Д.И. Степанчук, В.Ф. Солдатов, О.Н. Меркулов, Е.Г. Солонин, В.П. Кухта, «Исследования дроссельной дугогасящей катушки с продольным подмагничиванием», «Электрические станции», 1976г., №5.

5. И.Миронов, «Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ», Новости электротехники, №6(24), 2004г.

6. Лихачев Ф.А., «Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов» - М.: Энергия, 1971г.

7. Миронов И.А., Кричко В.А., «Автоматические устройства настройки компенсации емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ», ЭЛЕКТРО-ИНФО, №4, 2005г.