



Авторы:
 к.т.н. Малый А.П.,
 к.т.н. Шурупов А.А.,
 к.т.н. Дони Н.А.,
 Кочкин Н.А.,
 Карсаков В.Г.,
 ООО НПП «ЭКРА»,
 г. Чебоксары, Россия.



Малый Альберт Петрович
 В 1958 г. окончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 г.), старший научный сотрудник. Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА».



Шурупов Алексей Александрович
 В 1973 г. окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г.), старший научный сотрудник. Заведующий отделом защиты подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УРОВ

Часть 2. Реле тока и выдержка времени УРОВ

(Начало «Часть 1. Функциональная схема» – см. №1(14) март 2014)

Реле тока УРОВ

Реле тока УРОВ предназначено для определения отказавшего выключателя при КЗ в зоне – по наличию тока через него, и блокировки схемы УРОВ при отсутствии отказа выключателя – по отсутствию тока через это реле.

При использовании микропроцессорного исполнения реле тока УРОВ можно забыть об одной проблеме с надёжностью, которая известна у электромеханического реле тока УРОВ. У последнего трудно обеспечить термическую устойчивость, а также надёжность размыкания контакта при отключении тока КЗ большой кратности*, в результате чего приходилось вместо одного реле тока УРОВ использовать два с последовательным соединением контактов (кстати, это – один из аргументов против обвинения микропроцессорных защит в пониженной надёжности по сравнению с электромеханическими защитами).

Технические данные реле тока УРОВ приведены в табл. 1.

Выбор тока срабатывания РТ УРОВ

$$I_{CP\ RT\ УРОВ}$$

Расчётный вид КЗ и ток срабатывания реле тока УРОВ в зависимости от вида привода выключателя (трёхфазный или пофазный), длины линии (необходимости учёта распределённой ёмкости),

использования однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) определяются несколькими требованиями (ниже, для удобства, в табличках приведены условия, в которых эти требования предъявляются).

1. Обеспечение чувствительности при КЗ в конце зоны резервирования

вид привода	любой
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом и без
использование ОАПВ	с использованием и без
расчётный вид КЗ	любой

Для обеспечения чувствительности при КЗ первичный ток срабатывания I_{CP} реле тока УРОВ должен быть меньше минимального тока КЗ при междуфазных КЗ и КЗ на землю в конце зоны резервирования и ниже уставки последних ступеней резервных защит [3] (рис. 5).

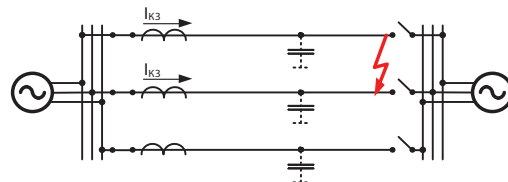


Рис. 5. Обеспечение чувствительности при КЗ в конце зоны резервирования

Табл. 1. Технические данные РТ УРОВ

Параметр	Значение
Диапазон уставок I_{CP} по току, * $I_{НОМ}$	0,04-0,40
Коэффициент компенсации k ёмкостного тока линии, о.е. от длины линии	0-1
Коэффициент возврата по току, не менее	0,95
Основная погрешность уставки по току, %, не более	10
Дополнительная температурная погрешность уставки РТ УРОВ по току, %, не более	5
Время срабатывания РТ УРОВ при $2 \cdot I_{CP}$, с, не более	0,025
Время возврата РТ УРОВ от $25 \cdot I_{CP}$ до 0, с, не более	0,03

* Проблема с электромеханическим реле тока УРОВ типа РТ40/р заключается в том, что из-за большой чувствительности этого реле при большой кратности тока КЗ подвижные контакты реле могут заскочить за неподвижные и остаться там (замыкая цепь действия через ДЗШ) после отключения КЗ.



Донин Николай Анатольевич

Окончил НПИ в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем. Директор по науке – заведующий отделом перспективных разработок.



Кочкин Николай Андреевич

В 1978 году окончил НПИ. Заместитель заведующего отделом ООО НПП «ЭКРА».



Карсаков Владимир Геннадьевич

Окончил в 2005 г. Чувашский государственный университет. В настоящее время работает заведующим сектором ООО НПП «ЭКРА».

$$I_{CP} \leq I_{K3\text{ мин}}/k_{\text{ч}} \quad (1)$$

где $I_{K3\text{ мин}}$ – минимальный ток, протекающий в месте установки УРОВ, при междуфазных КЗ и КЗ на землю в зоне резервирования защит линии; $k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, равный 1,5 при КЗ в конце защищаемой линии и равный 1,2 при КЗ в зоне резервирования защит (в конце предыдущего участка линии).

Обычно в сетях 110-220 кВ токи междуфазных КЗ больше, чем токи КЗ на землю, поэтому ток I_{CP} должен быть меньше уставки реле тока последней ступени ТЗНП:

$$I_{CP} \leq I_{УИ\text{V}\text{СТ}\text{ЗНП}} \quad (2)$$

где $I_{УИ\text{V}\text{СТ}\text{ЗНП}}$ – уставка реле тока IV (последней) ступени ТЗНП.

В то же время ток срабатывания реле тока УРОВ не следует принимать слишком низким, иначе, в условиях отключения тока КЗ очень большой кратности, переходный процесс во вторичных цепях ТТ может привести к увеличению времени возврата УРОВ.

2. Отстройка от ёмкостного тока линии после срабатывания защиты, отказа выключателя и самопогасания дуги

вид привода	любой
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом
использование ОАПВ	с использованием и без
расчётный вид КЗ	любой

Для отстройки от ёмкостного тока линии после срабатывания защиты, отказа выключателя и самопогасания дуги ток возврата РТ УРОВ должен быть больше ёмкостного тока линии [3] (рис. 6).

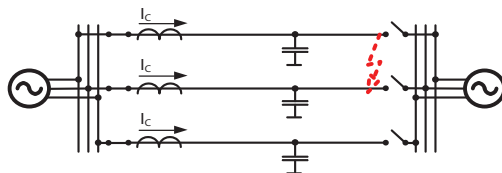


Рис. 6. Ёмкостный ток после срабатывания защиты, отказа выключателя и самопогасания дуги – трёхфазный привод

Следовательно, ток срабатывания I_{CP} должен быть больше:

$$I_{CP} \geq k_{OTC} I_C / k_{B3} \quad (3)$$

где $k_{OTC} = 1,5$ – коэффициент отстройки; I_C – ёмкостный ток линии, равный удельному ёмкостному току линии $I_{C\text{ уд}}$, умноженному на длину линии l . Для ВЛ 220 кВ, работающей на холостом ходу, $I_{C\text{ уд}}$ можно принять равным 0,35 А/км, а для ВЛ 110 кВ – 0,2 А/км [3]; k_{B3} – коэффициент возврата.

Если рассчитанный ток срабатывания удовлетворяет неравенствам (1)–(3), то компенсация ёмкостного тока линии не требуется, и коэффициент компенсации ёмкостного тока линии k принимается равным 0. Если нет, то k принимается больше нуля.

Измеряемый ток $I_{\text{ф}}$, который сравнивается с уставкой I_{CP} РТ УРОВ, в общем случае, рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{ф}} = |I_{\text{ф}} - k * I_C| = |I_{\text{ф}} - jk * b_1 * U_{\text{ф}} * l_{\text{л}}|,$$

где $I_{\text{ф}}$ – ток фазы;

$k = (0 \div 1)$ – коэффициент компенсации ёмкостного тока линии. При отсутствии на линии компенсирующих реакторов k принимается равным единице, а при их наличии – отношению некомпенсированной ёмкости линии к полной ёмкости линии. На коротких линиях k принимается равным нулю, и тогда измеряемый ток просто равен фазному току в месте установки реле тока УРОВ; I_C – ёмкостный ток линии; b_1 – удельная ёмкостная проводимость линии (задаётся в бланке уставок как общий параметр линии в виде удельной проводимости прямой последовательности b_1); $U_{\text{ф}}$ – первичное напряжение фазы в расчётном режиме; $l_{\text{л}}$ – длина линии (задаётся в бланке уставок как общий параметр линии).

На линии, отключённой на противоположном конце, ток неповреждённой фазы $I_{\text{НЕП.Ф}}$ равен ёмкостному току линии I_C . Учитывая коллинеарность составляющей от компенсации ёмкостного тока (КЕТ) в токе срабатывания I_{CP} РТ УРОВ, ток возврата I_{B3} и ток срабатывания I_{CP} РТ УРОВ могут быть определены через действительные (не комплексные) величины по формулам:

$$I_{B3} \geq K_{OTC} (I_{\text{НЕП.Ф}} - k * b_1 * U_{\text{НЕП.Ф}} * l_{\text{л}}) = K_{OTC} (1 - k) * b_1 * U_{\text{НЕП.Ф}} * l_{\text{л}}$$

а ток срабатывания I_{CP} :

$$I_{CP} \geq K_{OTC} (1 - k) * b_1 * U_{\text{НЕП.Ф}} * l_{\text{л}} / K_{B3} \quad (4)$$

где $K_{отс} = 1,5$ – коэффициент отстройки;
 k – коэффициент компенсации ёмкостного тока линии;

$U_{непф.}$ – первичное напряжение неповреждённой фазы при отказе выключателя этой фазы в расчётном режиме;

b_l – удельная ёмкостная проводимость линии;

l_l – длина линии.

После отключения КЗ с противоположной стороны ёмкостный ток линии в неотключившейся неповреждённой фазе может быть скомпенсирован полностью, то есть при выборе коэффициента компенсации ёмкостного тока линии k равным 1, значение уставки $I_{ср}$ РТ УРОВ по данному критерию может быть выбрано достаточно малым (без учёта реакторов).

3. Запрет УРОВ при отказе выключателя противоположного конца линии

вид привода	любой
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом
использование ОАПВ	с использованием и без
расчётный вид КЗ	1- или 2-фазный

В случае отказа выключателя противоположного конца линии реле тока УРОВ с компенсацией ёмкостных токов может не вернуться при k , не равном нулю (рис. 7).

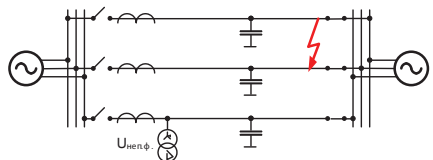


Рис. 7. Отказ выключателя противоположного конца линии

В результате при срабатывании автоматики ограничения повышения напряжения (АОПН) или дифзащиты линии УРОВ может быть запущен и подействует на ДЗШ.

Для предотвращения этого предусматривается построение схемы комбинированного РТ УРОВ, состоящего из двух реле тока КА1 и КА2 (рис. 8).

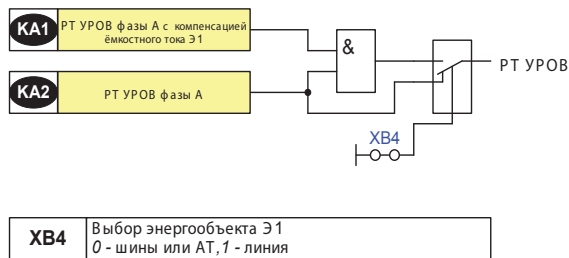
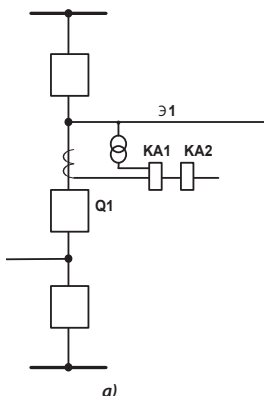


Рис. 8. Схема подключения (а) и схема РТ УРОВ (б)

В приведенной схеме реле тока КА1 выполнено с КЕТ, а реле тока КА2 – без (предложение Е.В. Лысенко) [8, 9]. Программной накладкой XB4 определяется алгоритм действия РТ УРОВ: при срабатывании только простого реле тока КА2 или при срабатывании одновременно реле тока КА1 и КА2.

В последнем случае предотвращается излишнее действие УРОВ от ёмкостного тока линии, отключённой с одного конца, как при отказе своего выключателя (рис. 6), так и при отказе выключателя противоположного конца линии (рис. 7). При отказе своего выключателя не срабатывает реле тока КА1 (с КЕТ), а при отказе выключателя противоположного конца линии не срабатывает реле тока КА2 (без КЕТ).

При использовании в УРОВ такого комбинированного реле тока отпадает необходимость отдельного УРОВ для автоматики ограничения повышения напряжения (АОПН), так как в этом случае АОПН ни при отказе выключателя противоположного конца линии (рис. 7), ни при отказе своего выключателя не сможет через такое УРОВ излишне подействовать на ДЗШ. При этом сигнал от АОПН на пуск УРОВ может приниматься таким же образом, как и сигналы от всех остальных устройств релейной защиты.

4. Отстройка от «тока отсоса» в ТТ отключённой фазы

вид привода	пофазный
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом и без
использование ОАПВ	с использованием
расчётный вид КЗ	1- или 2-фазный

На линиях с выключателями с пофазным приводом, оборудованных устройствами однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ), ток срабатывания РТ УРОВ должен быть, кроме того, отстроен от «тока отсоса», под которым подразумевается ток, протекающий через вторичную обмотку ТТ отключённой фазы под воздействием падения напряжения на сопротивлении Z_0 , включённом в нулевой провод «звезды» ТТ, от суммарного тока фаз, не отключаемых в цикле ОАПВ (рис. 9).

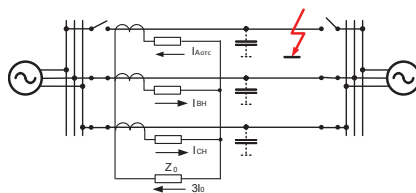


Рис. 9. Образование тока «отсоса» в отключённой фазе в цикле ОАПВ

Вторичные токи неповреждённых, оставшихся в работе в цикле ОАПВ фаз практически полностью замыкаются каждый через сопротивление Z_0



«звезды» ТТ. Эти токи, а значит, и ток $3 \cdot I_0$, протекающий в нулевом проводе «звезды» ТТ, в цикле ОАПВ не превышают номинального тока линии. Ток через имеющую большое сопротивление вторичную обмотку ТТ отключённой фазы $I_{А\text{отс}}$ (ток «отсоса») тем больше, чем больше сопротивление Z_0 , и составляет лишь малую часть тока $3 \cdot I_0$ и, во всяком случае, не превышает тока намагничивания ТТ в неповреждённой фазе, то есть $0,01 \cdot I_{НОМ}$ при номинальном первичном токе.

Ток возврата реле тока УРОВ должен быть больше тока «отсоса», следовательно, ток срабатывания $I_{СР}$ реле тока УРОВ при этом:

$$I_{СР} \geq K_{ЗАП} \cdot 0,01 \cdot I_{НОМ} / K_{ВЗ}, \quad (5)$$

где $K_{ЗАП} = 5$ – коэффициент запаса.

5. Отстройка от ёмкостного тока линии в неповреждённой фазе после отключения двухфазного КЗ и отказа выключателя в неповреждённой фазе

вид привода	пофазный
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом
использование ОАПВ	с использованием и без
расчётный вид КЗ	2-фазный

Для отстройки от ёмкостного тока линии после отключения двухфазного КЗ и отказа выключателя в неповреждённой фазе ток возврата РТ УРОВ должен быть больше ёмкостного тока линии [3] (рис. 10).

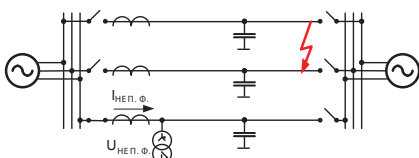


Рис. 10. Ёмкостный ток в неповреждённой фазе при отказе выключателя этой фазы

Ток срабатывания $I_{СР}$ реле тока УРОВ рассчитывается в этом случае по формуле (4).

6. Запрет УРОВ в цикле ОАПВ для предотвращения срабатывания РТ УРОВ от тока в неповреждённых фазах

вид привода	пофазный
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом и без
использование ОАПВ	с использованием
расчётный вид КЗ	1-фазный

В цикле ОАПВ по неповреждённым фазам может протекать достаточно большой ток нагрузки I_H , от которого сработают оба реле тока УРОВ-КА1 и КА2 (рис. 11):

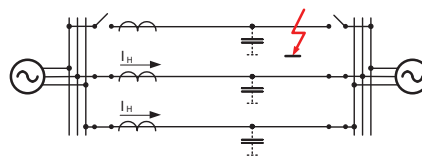
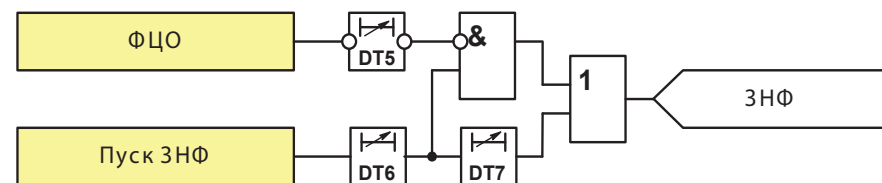


Рис. 11. Токи в неповреждённых фазах в цикле ОАПВ

Для предотвращения в этом режиме срабатывания УРОВ и действия его на ДЗШ предусмотрен запрет пуска УРОВ в цикле ОАПВ – (рис. 12):

Реле фиксации цикла ОАПВ (ФЦО) на заданное время DT5 продлевает блокировку пуска защиты от непереключения фаз выключателя (ЗНФ), запрещая появление сигнала «ЗНФР» (ЗНФ с контролем от реле тока IV ступени ТНЗНП) на входе функциональной схемы УРОВ.



DT5	Время продления блокировки ЗНФ в цикле ОАПВ (0,01...0,2) с
DT6	Задержка на срабатывание ЗНФ (0,01...0,2) с
DT7	Задержка на срабатывание деблокировки ЗНФ при невозврате ФЦО; (0,10...5,00) с

Рис. 12. Запрет пуска УРОВ в цикле ОАПВ

7. Проверка чувствительности РТ с КЕТ при КЗ в зоне

вид привода	любой
учёт распределённой ёмкости линии	с учётом
использование ОАПВ	с использованием и без
расчётный вид КЗ	любой

Выборный коэффициент компенсации k ёмкостного тока не должен ограничивать чувствительность реле тока УРОВ к токам КЗ любого вида в конце линии. П-образная схема замещения линии в этом режиме приведена на рис. 13:

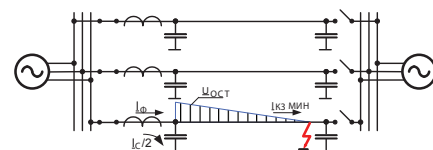


Рис. 13. Проверка чувствительности реле тока УРОВ с КЕТ при КЗ в конце линии

Коэффициент чувствительности КЧ реле тока УРОВ к КЗ в конце линии должен быть не менее 1,5:

$$K_{Ч} = (I_{Ф\text{КЗ мин}} - kI_C) / I_{СР} \geq 1,5,$$

где $I_{Ф\text{КЗ мин}}$ – фазный ток в месте установки защиты при минимальном токе однофазного КЗ в конце отключённой линии; k – коэффициент компенсации ёмкост-



ного тока линии;

I_C – ёмкостный ток линии на холостом ходу.

Диаграммы напряжения и токов для этого режима представлены на рис. 14.

Как видно из диаграммы, если при КЗ в конце линии обеспечивается чувствительность реле тока без КЕТ (модуль тока $I_{\Phi \text{ КЗ МИН}}$ больше $I_{\text{СР}} \cdot K_{\text{Ч}}$), то благодаря перекомпенсации (компенсируется полный ёмкостный ток вместо его половины) чувствительность реле тока с КЕТ обеспечивается автоматически.

Выбор выдержки времени УРОВ

DTI
 $t_{\text{СР}} \text{ УРОВ}$

Выдержка времени УРОВ должна выбираться по возможности минимальной, чтобы уменьшить последствия КЗ с отказом выключателя.

В то же время для обеспечения селективности выдержка времени действия УРОВ через ДЗШ должна быть больше минимально допустимой выдержки времени $T_{\text{СРУРОВМИН}}$ действия УРОВ «на себя», максимального времени отключения своего выключателя, времени возврата реле тока УРОВ и время запаса:

$$T_{\text{СРУРОВ}} \geq T_{\text{СРУРОВМИН}} = t_{\text{НС}} + t_{\text{ОВ}} + t_{\text{ВЗ}}_{\text{РТ}} + \Delta t_{\text{ЗАП}} = (0,13 \div 0,18) \text{с},$$

где $T_{\text{СРУРОВ}}$ – большая выдержка времени УРОВ, то есть выдержка времени действия УРОВ на ДЗШ;

$t_{\text{НС}} = 0,02$ с – меньшая выдержка времени УРОВ, то есть выдержка времени действия УРОВ «на себя», на свой ЭМО;

$t_{\text{ОВ}} = (0,03 \div 0,08)$ с – максимальное время отключения выключателя, которое определяется типом выключателя;

$t_{\text{ВЗРТ}} = 0,03$ с – время возврата реле контроля протекания тока (РТ УРОВ);

$\Delta t_{\text{ЗАП}} = 0,05$ с – время запаса.

При использовании режима УРОВ «С дублированным пуском» минимально допустимое время задержки УРОВ может быть уменьшено за счёт исключения отстройки от времени действия «на себя» и исключения времени возврата реле КЭС, которое при возврате пускает

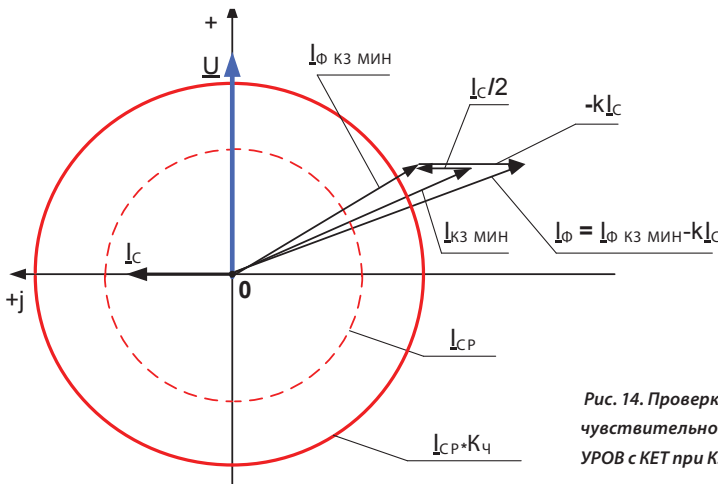


Рис. 14. Проверка чувствительности реле тока УРОВ с КЕТ при КЗ в конце линии

УРОВ, а начинает возвращаться одновременно с подачей сигнала на ЭМО [7]:

$$T_{\text{СРУРОВ}} \geq T_{\text{СРУРОВМИН}} = t_{\text{ОВ}} + t_{\text{ВЗРТ}} - t_{\text{ВЗКЭС}} + \Delta t_{\text{ЗАП}}$$

где $t_{\text{ВЗКЭС}} = 0,01$ с – время возврата реле КЭС, то есть минимальное время срабатывания выходного реле терминала, при срабатывании шунтирующего опtron КЭС.

Для того чтобы исключить нарушение динамической устойчивости работы энергосистемы после близкого трёхфазного КЗ (если такое нарушение возможно при КЗ на данной линии) выдержка времени $T_{\text{СРУРОВ}}$ должна быть меньше $T_{\text{СРУРОВМАКС}}$:

$$T_{\text{СРУРОВ}} < T_{\text{СРУРОВМАКС}} = t_{\text{ДУ}} - t_{\text{СР.З}} - t_{\text{ОВ}}$$

где $t_{\text{ДУ}}$ – максимально допустимое по условиям динамической устойчивости расчётное время повторного отключения близкого трёхфазного КЗ при отказе выключателя и действия УРОВ;

$t_{\text{СР.З}} = 0,04$ с – время срабатывания защиты;

$t_{\text{ОВ}} = 0,08$ с – время отключения выключателя.

Заключение

Рекомендации по выбору параметров УРОВ, приведенные в статье

для частного случая, применительно к УРОВ линии, могут, однако, быть использованы и для УРОВ присоединений другого вида, например, УРОВ трансформатора (автотрансформатора) или УРОВ секционного выключателя – с поправками на свойства коммутируемого данным выключателем объекта.

Использование комбинированного РТ УРОВ в шкафах с автоматикой управления выключателем позволяет не предусматривать отдельного УРОВ в шкафах АОПН.

Выбор режима «С дублирующим пуском» позволяет уменьшить время срабатывания УРОВ.

В статье не рассмотрены вопросы взаимодействия локальных УРОВ и локальных УРОВ с централизованным – вопросы, которые становятся актуальными в связи со всё большим распространением локальных УРОВ и требуют отдельного рассмотрения.

Литература

7. Беркович М.А. Основы техники релейной защиты / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семёнов. – М.: Энергия, 1984. – 376 с.
8. Лысенко Е.В., Красева В.Н., Кузнецова Л.Д., Сильченко В.В., Климов А.А. Устройство резервирования ПДЭ 2005 при отказе выключателей // Электрические станции. – 1986. – №2. – С. 53-60.
9. Шамис М.А., Кочкин Н.А., Лысенко Е.В. Шкаф типа ШЭ2001 устройства резервирования при отказе выключателей энергообъектов сверхвысокого напряжения // Электротехника. – 1990. – №2. – С. 29-34. [8]