

УДК 621.316.925.4:519.21

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСТАНЦИОННЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Чан Хоанг Куанг Минь, А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет  
E-mail: thqminhkt@gmail.com

*Рассматривается алгоритм оценки технического эффекта и технической эффективности дистанционной релейной защиты линий. Дается обоснование составляющих данных выражений: коротких замыканий на защищаемой линии как потенциально возможного эффекта, также потерь: отказов срабатывания излишних и ложных действий.*

### **Ключевые слова:**

*Техническая эффективность; дистанционная релейная защита; электрическая сеть; плотность распределения вероятностей; закон распределения вероятностей.*

### **Key words:**

*Technical efficiency; distance relay protection; electric network; probability distribution density; probability distribution function.*

### **Введение**

Оценка технической эффективности функционирования релейной защиты (РЗ) как разности потенциально возможного эффекта в виде показателя коротких замыканий (КЗ) на защищаемом объекте и потерь (отказы срабатывания, ложные и излишние действия), отнесенной к потенциальному эффекту, является актуальной задачей проектирования и эксплуатации РЗ электрооборудования и электрических сетей. Поэтому данному вопросу всегда уделялось внимание при анализе статистики работы средств РЗ, например, [1]. Однако при этом возникают проблемы представительности разных составляющих статистических данных указанной разности. Некоторые данные, например, КЗ являются довольно массовыми, а такие события как отказы срабатывания релейной защиты при внутренних КЗ, излишние действия при внешних КЗ, ложные действия при ненормальных, например, асинхронных, неполнофазных режимах являются весьма редкими. В связи с этим неправомерно использовать статистические характеристики с разной достоверностью в интересующем критериальном функционале. Поэтому становится актуальной проблема обеспечения статистической адекватности всех составляющих в рассматриваемом функционале.

Логичным путем разрешения данной проблемы может быть разработка расчетных методов формирования бедной статистики одних событий по достаточно полноценной статистике других событий. Этот путь фактически реализован в известном правиле теории вероятностей определения вероятности совместного осуществления или произведения случайных событий, т. е. правиле умножения вероятностей или умножения вероятности одного события на условную вероятность другого события при условии, что первое произошло. Если первое событие является весьма достоверным, т. е. статистика этого события является представительной, и если условная вероятность второго события как малая доля достоверности первого события логиче-

ским или расчетным способом найдена достаточно точно и однозначно, то незначительные значения вероятности совмещения правомерно считать точно и однозначно полученными. Гарантом при этом является вероятность весьма достоверного события.

В ряде практических случаев такие ситуации имеют место, когда практически точная оценка доли или условной вероятности интересующего редкого события, например, отказов срабатывания при КЗ, ложного действия при неполнофазных или асинхронных режимах могут быть найдены практически точно.

Одной из таких логико-расчетных процедур для целей, прежде всего основных (первой и второй) ступеней дистанционной релейной защиты является следующая цепь логических рассуждений. Чтобы иметь меньшие потери в сети от потоков реактивной мощности стремятся обеспечить одинаковые или близкие по величине напряжения вдоль ветвей и в узлах сети. Это обуславливает практически равные вероятности КЗ в разных точках линий и, следовательно, равные вероятности сопротивлений, замеряемых дистанционной РЗ от мест размещения ее на концах линии до места КЗ на линии. Названные равные вероятности сопротивлений от мест расположения комплектов дистанционной защиты на концах двухконцевой линии до места КЗ означает, что закон распределение вероятностей (ЗРВ) сопротивлений при КЗ на линиях, замеряемых каждым комплектом РЗ, оказывается равномерным. Это распределение вероятностей является условным. Условием является пространство конкретной линии, на котором произошло КЗ.

Другой логико-расчетной процедурой, разработанной в Томском политехническом университете, является метод селекции границ исходных и выходных данных [2–4], позволяющий по ЗРВ аргументов функциональной зависимости получать приближенно, но быстро ЗРВ разных функциональных зависимостей любой размерности, например, замеряемого сопротивления резервирующей

ступени дистанционной защиты линии. Такие ЗРВ следует рассматривать при определении составляющих технического эффекта и потерь как условные, т. к. они относятся к вполне определенной функциональной зависимости электрической величины (сопротивления) конкретной ветви схемы электрической сети. Для случаев, когда вид ЗРВ функциональной зависимости известен заранее (например, нормальный ЗРВ для массовых сумм составляющих-аргументов или линейной комбинации степенного разложения функциональной зависимости), метод селекции границ исходных и выходных данных позволяет найти параметры ЗРВ функциональных зависимостей практически точно [3].

**Основная часть**

С учетом изложенного далее рассматриваются определение, анализ и использование критерия технической эффективности, а также числителя этого критерия (разности потенциального эффекта и потерь, который называется техническим эффектом) для дистанционных защит (ДЗ) линий. Потери обычно подразделяют на несколько составляющих, обусловленных разными причинами: отказами аппаратуры, ошибками эксплуатирующего персонала, стихийными бедствиями, функционированием сети и РЗ. В данной работе рассматриваются

потери, обусловленные функционированием сети и РЗ, т. е. определяемые условиями разной топологии сети, режимов источников, коммутационных состояний, видов КЗ, рабочих, асинхронных и неполнофазных ненормальных режимов. Такой выбор сделан потому, что указанные условия функционирования могут быть изменены проектировщиками, расчетчиками и эксплуатационным персоналом путем изменения уставок, которые зависят от названных факторов через параметр реагирования. От других причин: аппаратурных отказов, ошибок персонала, стихийных событий настройка РЗ не зависит.

Особенность дистанционной РЗ, состоит в реагировании на конструкторский параметр КЗ сопротивление. Этот параметр реагирования распределен по наиболее простому и с конечными конкретными границами равномерному ЗРВ на пространстве каждой линии и других компонентов сети. Поэтому целесообразно алгоритм технической эффективности построить с обязательным сохранением использования равномерного ЗРВ. Эта рекомендация относится ко всем ступеням дистанционной защиты (ДЗ), однако наиболее просто и однозначно в виде простейшей короткозамкнутой цепи, она реализуется при замерах сопротивлений от начала защищаемых линий до мест КЗ на них.

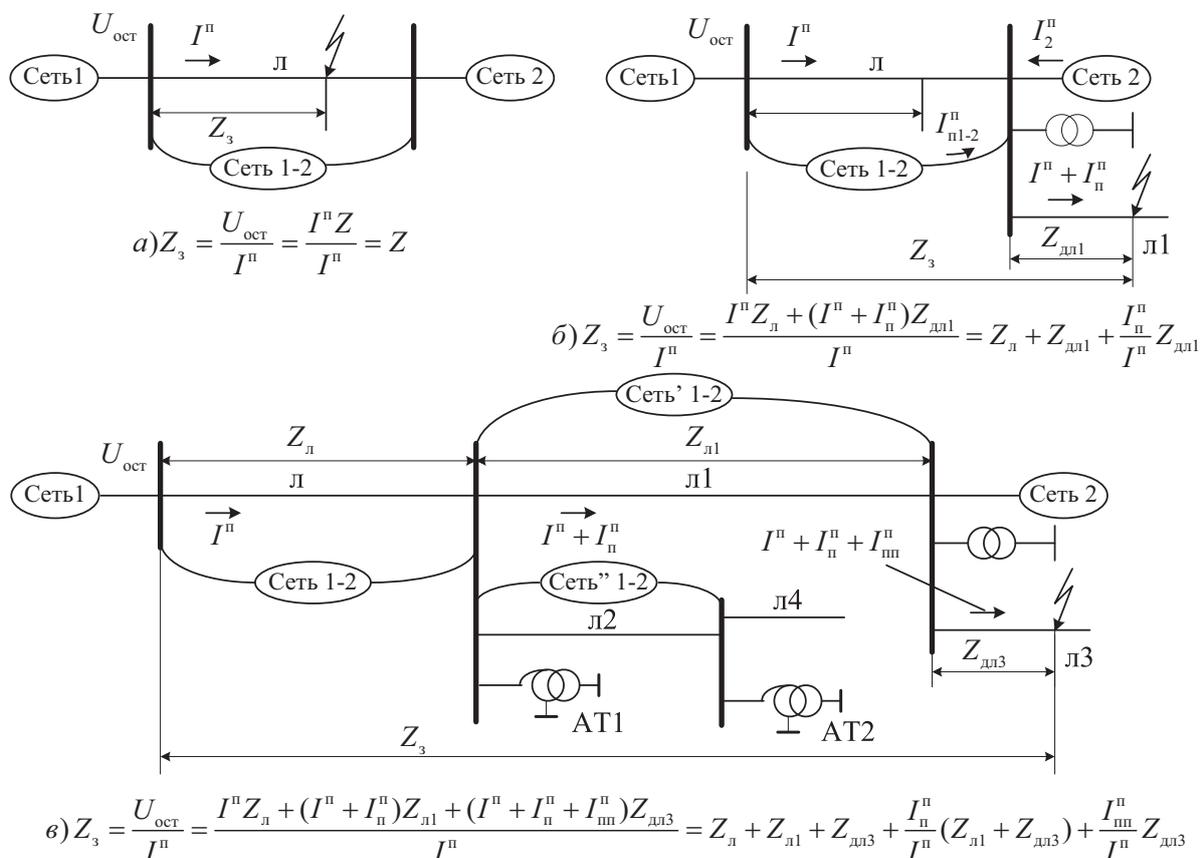


Рис. 1. Измерение сопротивления короткозамкнутой цепи дистанционной релейной защиты при КЗ на: а) защищаемой; б) предыдущей линии и в) предыдущей к предыдущей линии

При замерах в условиях КЗ на предыдущих элементах сети (отходящих от шин противоположных подстанций в направлении действия ДЗ) необходимо учитывать подпитки места КЗ от дополнительных источников, подключенных к противоположным подстанциям каждой защищаемой линии. При замерах КЗ на предыдущих к предыдущим компонентах сети, которые фиксирует резервирующая ступень ДЗ, необходим также дополнительный учет подпиток от источников, подключенных к противоположным подстанциям предыдущих элементов. Наглядное представление о измеряемом сопротивлении  $Z$ , дано на рис. 1.

Распределение вероятностей сопротивлений от начала каждой линии до места КЗ на ней, также сопротивлений схем замещения трансформаторных элементов в условиях электрических величин каждого компонента схемы замещения принято равномерным, т. е. ПРВ на каждом компоненте или его участке неоднородности обратно пропорционально сопротивлению этого участка. Как показывает анализ, данное предположение имеет место в чистом виде для каждого из участков линий, также достаточно приемлемо для межобмоточных сопротивлений трансформаторных элементов. Последнее правомерно, т. к. значения напряжений относительно земли пространства между выводами обмоток в рабочих режимах логично предположить не сильно изменяющимися, а, следовательно, можно принять практически равномерное распределение межобмоточных сопротивлений от выводов обмоток до места виртуального КЗ пространства между данными выводами. Что касается лучевых сопротивлений звездчатых преобразований многоугольников из межобмоточных сопротивлений, то распределение вероятностей сопротивлений частей этих лучей от выводов обмоток до виртуального места КЗ следует принять также равномерным как составляющих равномерно распределенных межобмоточных сопротивлений.

Проведенный ранее анализ технического эффекта и технической эффективности показал, что составляющие этих критериев (потенциально-возможный эффект и потери) могут быть выражены в двух вероятностных формах: в виде параметров потоков событий или вероятностей состояний. Более полными и диверсифицируемыми под интересующие конкретные задачи являются вероятности состояний, т. к. в них учтены как частоты явлений (событий, или начала состояний), так и продолжительности состояний, определяемые смыслом состояний (последствия событий).

Так, после КЗ можно рассматривать состояние обнаружения КЗ измерительными органами РЗ, которое длится на протяжении нескольких периодов промышленного тока (сотые доли секунды), состояние отключения КЗ в течение суммы времен: обнаружения КЗ, выдержки времени ступени защиты и времени работы силового выключателя (доли секунды или несколько секунд), отключенного состояния в течение от момента КЗ до окон-

чания аварийного ремонта. Ясно, что состояние, предшествующее включению в работу отремонтированного поврежденного при КЗ силового элемента, мало или ничего не имеет общего с состоянием обнаружения КЗ релейной защитой.

Во всех названных случаях параметр потока КЗ один, но состояния принципиально разные, каждое из которых имеет смысл в рамках разных задач. Поэтому для формирования компонентов технического эффекта и технической эффективности в качестве вероятностной характеристики выбрана не параметры потоков событий, а интересные состояния после КЗ, которые определяют функционирование РЗ.

Технический эффект  $E$  в вероятностной форме каждой ступени ДЗ может быть представлен выражениями при КЗ:

- междуфазных

$$E_{\text{№к}}^{\text{с,м}} = p(A_{\text{№к}}^{\text{с,м}}) - p(O_{\text{№к}}^{\text{с,м}}) - p(L_{\text{№к}}^{\text{э}}) - p(L_{\text{№к}}^{\text{ап,м}}) - p(I_{\text{№к}}^{\text{с,м}}),$$

- на землю

$$E_{\text{№к}}^{\text{с,1}} = p(A_{\text{№к}}^{\text{с,1}}) - p(O_{\text{№к}}^{\text{с,1}}) - p(L_{\text{№к}}^{\text{э}}) - p(L_{\text{№к}}^{\text{ап,1}}) - p(I_{\text{№к}}^{\text{с,1}}),$$

где буквой  $p$  обозначены вероятности событий:  $A$  – КЗ на защищаемой линии,  $O$  – отказов срабатывания,  $L$  – ложных,  $I$  – излишних действий; нижние индексы означают: № – номер защищаемой линии, к – обозначение ее концов; верхние индексы: с – обозначение ступеней, например I, II, III, м – междуфазных, 1 – однофазных КЗ, э – рабочих эксплуатационных состояний, ар – асинхронных режимов, нпф – неполнофазных режимов.

Первая составляющая выражений  $p(A_{\text{№к}}^{\text{с,м}})$  и  $p(A_{\text{№к}}^{\text{с,1}})$  – это потенциально-возможный эффект, на который рассчитывается ДЗ, а остальные – соответствующие потери.

Далее приводится формирование составляющих технического эффекта для компонентов ДЗ от междуфазных КЗ для одного из концов линии, например,  $k=1$ .

Первая составляющая технического эффекта  $p(A_{\text{№к}}^{\text{с,м}})$  как имеющая достаточно представительную статистику при КЗ на защищаемой линии определяется выражениями:

$$p(A_{\text{№к}}^{\text{с,м}}) = \omega_{\text{№к}}^{(\text{м})} \cdot m(T_{\text{№к1}}^{\text{с,м}}),$$

$$\omega_{\text{№к}}^{(\text{м})} = \omega_{\text{№к}} - \omega_{\text{№к}}^{(1)} = \omega_y [1 - p(K1)] \cdot \frac{l_{\text{№к}}}{100},$$

где  $\omega_{\text{№к}}^{(\text{м})}$  – параметр междуфазных КЗ защищаемой линии;  $\omega_{\text{№к}}^{(1)}$  – то же самое при однофазных КЗ;  $\omega_y$  – удельный параметр потока КЗ на 100 км длины, который зависит от класса напряжения сети;  $p(K1)$  – среднее значение вероятности однофазных КЗ в высоковольтных сетях;  $l_{\text{№к}}$  – длина в км защищаемой линии;  $m(T_{\text{№к1}}^{\text{с,м}})$  – средняя продолжительность обнаружения и отключения КЗ для с-й ступени при междуфазных КЗ.

Другие составляющие (потери отказов срабатывания, излишних действий, ложных действий при асинхронных и неполнофазных режимах) статистически существенно менее представительны. Поэтому их вероятности, приведенные к одним и тем условиям, определяются путем совмещения с более представительными событиями, с которыми они происходят, т. е. как произведение безусловных вероятностей последних на условные вероятности указанных потерь. Первые из данных вероятностей определяются как произведения естественно-безусловных параметров потоков представительных событий на среднюю продолжительность их формирования, а вторые условные вероятности находятся по модификациям метода СГИД [3].

Таким образом, вероятность отказов срабатывания определяется по выражению:

$$p(O_{№,1}^{c,m}) = p(O_{№,1}^{c,m}/A_{№}^{c,m}) p(A_{№}^{c,m}),$$

а вероятность ложных действий при асинхронных режимах по следующей системе выражений:

$$p(L_{№,1}^{ap}) = p(L_{№,1}^{ap}/AP_{№}) p(AP_{№}),$$

$$p(AP_{№}) = \omega_{№}^{ap} m(T_{№}^{алар}), \quad \omega_{№}^{ap} = \frac{1}{m(T_{мар})},$$

где  $AP_{№}$  – событие асинхронного режима по защищаемой линии;  $\omega_{№}^{ap}$  – параметр потока  $AP_{№}$  в предположении экспоненциального ЗРВ времени между этими событиями;  $m(T_{мар})$  – средняя продолжительность между наблюдаемыми событиями возникновения асинхронных режимов, фиксируемая отчетной статистикой российских энергосистем;  $m(T_{№}^{алар})$  – средняя продолжительность (уставка времени) действия автоматики ликвидации асинхронного режима.

Вероятность излишних действий формируется с помощью выражения:

$$p(I_{№,1}^{c,m}) =$$

$$= \sum_{n=1}^{n_n} \left[ \frac{1}{2} p(D_{n,1}^{c,m}/BK_{n,1}^{№1}) + p(O_{n,1}^{c,m}/BK_{n,1}^{№1}) \right] \times \\ \times p(BK_{n,1}^{№1}),$$

где излишние действия рассматриваемой ступени  $I_{№,1}^{c,m}$  сформированы за счет функциональных действий  $D_{n,1}^{c,m}$  и отказов в срабатывании  $O_{n,1}^{c,m}$  комплекта п,1 равновременной с-й ступени ступенчатой защиты п-й предыдущей линии, либо в целом п-й дифференциальной защиты п-го предыдущего трансформатора или автотрансформатора, быстродействующей основной РЗ линий с обменом информацией между комплектами на концах линии,  $(1/2) p(D_{n,1}^{c,m}/BK_{n,1}^{c,m}), p(O_{n,1}^{c,m}/BK_{n,1}^{c,m})$  – условные вероятности излишних действия с-й ступени комплекта рассматриваемой ДЗ №,1 при КЗ на предыдущем п-ом элементе  $BK_{n,1}^{№1}$  и при действии  $D_{n,1}^{c,m}$  и отказе  $O_{n,1}^{c,m}$  с-й ступени ближайшего к ДЗ №,1 комплекта п,1 п-го предыдущего элемента, причем коэффициент 1/2 учитывает случаи излишних действий с-й ступени рассматриваемой ДЗ №,1 за счет правильного действия с-й ступени ДЗ п,1 п-го предыдущего элемента при равноновременных выдержках времени названных ступеней, т. е. вследствие взаимодействия ступеней с одинаковой выдержкой времени, когда только и возможно указанное излишнее действие;  $p(BK_{n,1}^{№1})$  – вероятность состояния КЗ на п-м предыдущем элементе, попадающем в зону действия с-й ступени рассматриваемой ДЗ №,1.

Вероятность ложных действий в эксплуатационных условиях находится по формуле:

$$p(L_{№,1}^3) = p(L_{№,1}^3/\mathcal{E}) p(\mathcal{E}),$$

где безусловная вероятность эксплуатационного состояния определяется как вероятность противоположного события всех ранее указанных состояний, т. е.

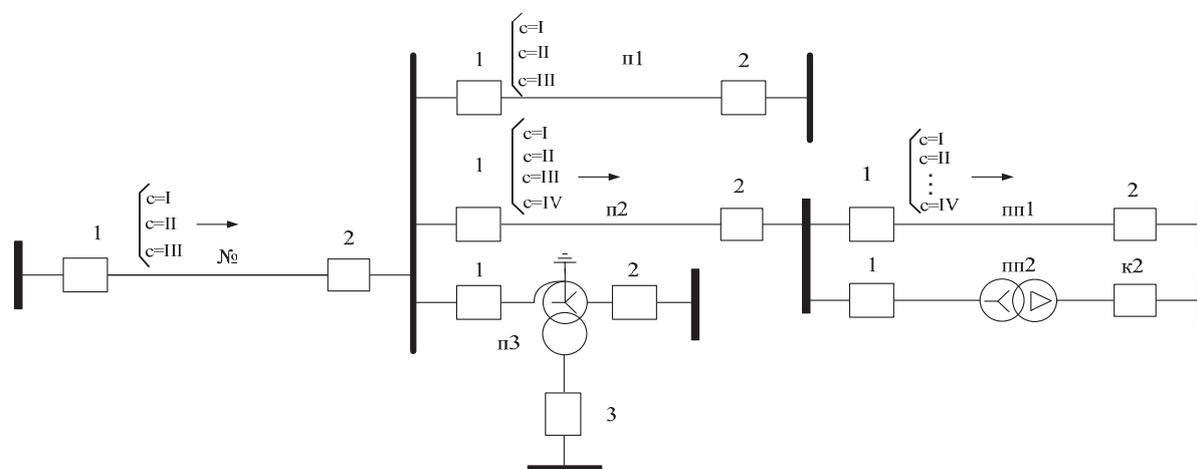


Рис. 2. Размещение релейных защит в сети: на линиях №, п1, пп1 с концами 1 и 2; на автотрансформаторе п2 с выводами 1, 2, 3, также обозначениями №, п, пп – основных защит и с – ступеней ступенчатых защит

$$p(\mathcal{E}) = 1 - p(A_{N_0}^{c,m}) - p(AP_{N_0}) - \sum_{n=1}^{n_n} p(BK_n^{N_0,1}).$$

Вероятности состояний внешних КЗ  $p(BK_n^{N_0,1})$  определяются границей уставки  $z_{n,N_0,1}^{c,m}$  каждой ступени рассматриваемой ДЗ №,1 в координатах защиты на захватываемом ДЗ №,1 поле предыдущих элементов. Указанные границы и вероятности формируются с помощью разных последовательностей формул.

В случае ступенчатой дистанционной РЗ на предыдущей линии п1 граница каждой ступени ДЗ №,1 определяется через коэффициент токораспределения между защитами №,1 и п1,1, причем для ДЗ от междуфазных КЗ могут использоваться токи трехфазного КЗ, т. е.

$$z_{n,N_0,1}^{c,m} = (z_{N_0,1}^{c,m} - z_{N_0})k_{N_0,1-p1,1},$$

где  $z_{\#}$  – сопротивление защищаемой линии №, а коэффициент токораспределения между защитами №,1 и п1,1 определяется отношением токов через эти защиты при КЗ на п-м предыдущем элементе.

Сама вероятность  $p(BK_n^{N_0,1}) = \omega_{n,N_0,1}^{c,m} m(T_{N_0,1}^{c,m})$  является произведением параметра потока КЗ  $\omega_{n,N_0,1}^{c,m}$  в зоне, захватываемой на п-м предыдущем элементе с-й ступенью ДЗ №,1, на среднюю продолжительность действия (уставку) этой защиты  $m(T_{N_0,1}^{c,m})$ . Параметр потока  $\omega_{n,N_0,1}^{c,m}$  определяется для п-й предыдущей линии по выражению:

$$\omega_{n,N_0,1}^{c,m} = \omega_{n,N_0,1} - \omega_{n,N_0,1}^{(1)} = \omega_y [1 - p(K1)] \frac{l_{n,N_0,1}}{100},$$

где  $l_{n,N_0,1} = \frac{z_{n,N_0,1}^{c,m}}{z_{yn}}$  – длина в км, захватываемая с-й

ступенью ДЗ №,1 на п-м предыдущем элементе,  $z_{yn}$  – удельное сопротивление на один километр длины предыдущей линии, остальные составляющие аналогичны вышеприведенному выражению на с. 74 для защищенной линии.

В случае п-го предыдущего трансформатора и автотрансформатора обсуждаемый параметр потока  $\omega_{n,N_0,1}^{c,m}$  может быть найден по выражению

$$\omega_{n,N_0,1}^{c,m} = \frac{z_{n,N_0,1}^{c,m}}{z_T} \omega_T^m,$$

где  $z_T$  – межобмоточное сопротивление трансформатора (автотрансформатора);  $\omega_T^m = [1 - p(K1)] \omega_T$  – параметр потока многофазных КЗ трансформатора (автотрансформатора);  $\omega_T$  – параметр потока повреждений трансформатора (автотрансформатора).

Условные вероятности  $p(D_{n1}^{c,m}/BK_n^{N_0,1})$ ,  $p(O_{n1}^{c,m}/BK_n^{N_0,1})$  при равномерном ЗРВ по пространству п-го предыдущего элемента определяются как произведение ПРВ  $c_n(z) = 1/z_n$  равномерного ЗРВ и промежутками сопротивления прямой последовательности  $z_n$  п-го предыдущего элемента, формируемыми границей с-й ступени рассматриваемой защиты линии № 1 и уставками ступенчатых защит п1,1, п2,1 или защит с жестким выделением областей действия п-х

предыдущих элементов (трансформаторов, автотрансформаторов). Так, в случае п1-й предыдущей линии можно получить:

- при  $z_{n1,N_0,1}^{c,m} < z_{n1,1}^m$  (рис. 3, а)

$$p(D_{n1,1}^{c,m}/BK_{n1}^{N_0,1}) = c_n(z) z_{n1,N_0,1}^{c,m};$$

- при  $z_{n1,N_0,1}^{c,m} > z_{n1,1}^m$  (рис. 3, б)

$$p(D_{n1,1}^{c,m}/BK_{n1}^{N_0,1}) = c_{n1}(z) z_{n1}^m,$$

$$p(O_{n1,1}^{c,m}/BK_{n1}^{N_0,1}) = c_{n1}(z)(z_{n1,N_0,1}^{c,m} - z_{n1}^m),$$

где  $z_{n1}^m$  – сопротивление уставки РЗ п-го предыдущего элемента, причем в случае ДЗ на этом элементе  $z_{n1}^m = z_{n1,1}^{c,m}$ .

Уставки всех РЗ на каждом предыдущем элементе целесообразно указать или привести в виде сопротивления, т. к. сопротивления короткозамкнутых цепей распределены по равномерному ЗРВ, который позволяет просто вычислять условные вероятности действий и отказов срабатывания защит предыдущих компонентов. Поэтому ниже рассматривается преобразование уставок токовых защит к виду сопротивлений, что в каждом случае обеспечивается рядом необходимых исходных данных и алгоритмических выражений и преобразований.

В случае дифференциальной токовой защиты на предыдущем автотрансформаторе п3 (рис. 2) исходные данные это: уставка в естественных координатах дифференциального тока чувствительной ступени, которая обозначена  $i_{n3}^{дч}$ , уставка в координатах дифференциального тока грубой ступени  $i_{n3}^{гр}$ , также  $i_a^c$  – максимальный сквозной ток при внешних КЗ,  $k_{np} = 1,5 i_a^c / i_{n3}^{дч}$  – коэффициент преобразования уставки из координат дифференциального тока в координаты сквозного тока,  $i_{n3}^{дч} = i_{n3}^{дч} k_{np}$  – уставка чувствительной ступени в координатах сквозного тока. Далее производится проверка минимальной чувствительности чувствительной ступени при двухфазных и однофазных КЗ на каждой стороне при отключенном выключателе на этой стороне и вычислении остаточных фазных напряжения на других сторонах.

Коэффициент чувствительности дифференциальной защиты автотрансформатора рассматривается для всех расчетных случаев, но выбирается минимальное значение соответственно для двух- и однофазных КЗ. Уставка дифференциальной защиты в виде сопротивления определяется соотношением максимального остаточного напряжения при двух- и однофазном КЗ на той стороне автотрансформатора, на которых чувствительность дифференциальной защиты получается минимальной. Так, для междуфазных КЗ, чувствительность при которых проверяется по двухфазным КЗ, искомое сопротивление уставки будет  $z_{n3}^m = (u_{фост.п3}^{(2)} / i_{n3}^{дч}) k_{щп}^{(2)}$ , причем  $u_{фост.п3}^{(2)} = \max\{u_C^{(2,B)}, u_H^{(2,B)}\}$  или  $\max\{u_C^{(2,C)}, u_H^{(2,C)}\}$  или  $\max\{u_C^{(2,H)}, u_H^{(2,H)}\}$ , а минимальный  $k_{щп}^{(2)}$  получается соответственно при КЗ на высшей (В), средней (С) или низшей (Н) стороне автотрансформатора. При однофазных КЗ сопротивление уставки находится

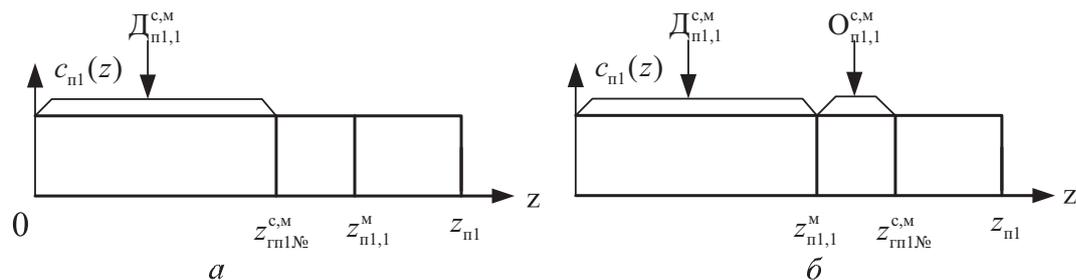


Рис. 3. Области отказа срабатывания и действия ДЗ на предыдущей линии п1

по выражению  $z_{п3}^{(1)} = (u_{\text{фост.п3}}^{(1)} / i_{п3}^{c(1)}) K_{\text{чип}}^{(1)}$ , причем  $u_{\text{фост.п3}}^{(1)} = (u_c^{(1,B)} \text{ или } u_n^{(1,C)})$ , а минимальный  $K_{\text{чип}}^{(1)}$  рассчитывается при двухфазных КЗ на высшей (В) или средней (С) стороне автотрансформатора.

В случае ступенчатой токовой защиты нулевой последовательности на предыдущей линия п1 (рис. 2) в качестве исходных данных рассматриваются уставки ступеней  $i_{п1,1}^c$ . Далее определяются минимальные коэффициенты чувствительности  $K_{\text{чип1,1}}^{c(1)}$  при одно- и  $K_{\text{чип1,1}}^{c(4)}$  двухфазном КЗ на землю в предопределяемом руководящими указаниями месте (удаленные или противоположные концы предыдущих линий), а также фазные напряжения  $u_{\text{фн1,1}}^{c(1)}$ ,  $u_{\text{фн1,1}}^{c(4)}$  и токи  $i_{п1,1}^{c(1)}$ ,  $i_{п1,1}^{c(4)}$  в месте расположения защиты линии п1 при проверке ее чувствительности. На основании этой информации определяются уставки в виде сопротивления при двух- и однофазном КЗ на землю:

$$z_{п1,1}^{c(4)} = \frac{u_{\text{фн1,1}}^{c(4)}}{i_{п1,1}^{c(4)}} \cdot K_{\text{чип1,1}}^{c(4)}, \quad z_{п1,1}^{c(1)} = \frac{u_{\text{фн1,1}}^{c(1)}}{i_{п1,1}^{c(1)}} \cdot K_{\text{чип1,1}}^{c(1)}.$$

Аналогичны исходные данные и преобразования имеют место в случае токовых защит, реагирующих на полные фазные величины, т. е. уставки ступеней  $i_{п1,1}^c$ , минимальный коэффициент чувствительности  $K_{\text{чип1,1}}^{c(2)}$  при двух- и  $K_{\text{чип1,1}}^{c(1)}$  однофазном КЗ, также фазные напряжения  $u_{\text{ф№,1}}^{c(1)}$ ,  $u_{\text{ф№,1}}^{c(2)}$  и токи  $i_{№,1}^{c(1)}$ ,  $i_{№,1}^{c(2)}$  на предыдущих линиях при проверке её чувствительности в месте расположения защиты соответственно при двухфазном и однофазном КЗ. Тогда уставки в виде сопротивления при двухфазном и однофазном КЗ на землю будут:

$$z_{№,1}^{c(2)} = \frac{u_{\text{ф№,1}}^{c(2)}}{i_{№,1}^{c(2)}} \cdot K_{\text{чип№,1}}^{c(2)}, \quad z_{№,1}^{c(1)} = \frac{u_{\text{ф№,1}}^{c(1)}}{i_{№,1}^{c(1)}} \cdot K_{\text{чип№,1}}^{c(1)}.$$

Аналогично расписывается алгоритм для однофазных комплектов ДЗ.

Представленные алгоритмы были применены для первой ступени ДЗ одной из линий Тюменской энергосистемы. Технический эффект первой ступени ДЗ составил при междуфазных КЗ  $E_{№,1}^{1,M} = 35,9 \cdot 10^{-10}$ , при однофазных –  $E_{№,1}^{1,1} = 132,45 \cdot 10^{-10}$ . Соответствующая техническая эффективность при междуфазных КЗ  $E_{№,1}^{1,M} = 78,2\%$ , а однофазных КЗ  $E_{№,1}^{1,1} = -116\%$ .

Получение отрицательного эффекта при однофазных КЗ, как видно из представленных вычислений, обусловлены очень большим числом ложных

действий, которое может быть снижено путем грубления уставки. Оптимальные значения уставок в обоих случаях имеют место при снижении уставок относительно первоначальных, равных сопротивлению линии. Следует отметить незначительный удельный вес излишних действий при принятых коэффициентах приведения их к отказам срабатывания. При этом имеет место явная зависимость от количества и номенклатуры предыдущих присоединений, что не учитывается в отчетной и справочной статистике. Незначительной является составляющая ложных действий при асинхронном режиме. Влияние неполнофазного режима учтено только при определении вероятности эксплуатационных режимов, а при вычислении технического эффекта не учтено в предположении вывода из работы дистанционных защит устройством однофазного автоматического повторного включения.

### Заключение

1. Представлен вероятностный алгоритм настройки дистанционной релейной защиты сетей, основанный на количественной мере технической эффективности, который позволяет определять оптимальную уставку, оценивать степень объективной полезности выбранной уставки, полученной путем применения экспертно-руководящего метода или интуитивно назначенной профессионалом.
2. С появлением объективного критерия и аппарата для расчета оптимальных уставок в эксплуатационных условиях и основы для автоматической настройки гибких релейных защит появилась перспектива оперативного использования свойства гибкости цифровых релейных защит.
3. Предложенный вероятностный метод позволяет оптимально настроить все каналы релейных защит сети и объективно оценить возможности желаемого изменения уставок.
4. Разработка полной программы, реализующей алгоритм, позволит сократить или полностью исключить рутинный труд расчета уставок релейной защиты. Такая программа может служить инструментом для проектирования, эксплуатации и наладки релейной защиты и автоматики.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Shmoilov A.V. Probability technologies in electric power industry // Proc. 6<sup>th</sup> Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology KORUS-2002. – Novosibirsk, 2002. – V. 2. – P. 421–424.
3. Шмойлов А.В., Кривова Л.В., Стоянов Е.И., Игнатъев К.В. Вероятностный метод селекции границ интервалов данных для

- задач электроэнергетики // Известия вузов. Сер. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8/1. – С. 144–155.
4. Prutik A.F., Shmoilov A.V. Setting-up algorithms of relay protection // Proc. IV Intern. Forum on Strategic Technology (IFOST 2009). – Ho Chi Minh, Vietnam, October 21–23, 2009. – Ho Chi Minh: City University of Technology, 2009. – P. 45–50.

Поступила 18.05.2011 г.

УДК 621.373.1

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА СИММЕТРИИ  
ПРИ СИНТЕЗЕ СТРУКТУР ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Ю.К. Рыбин

Томский политехнический университет  
E-mail: rybin@tpu.ru

*Обсуждается возможность применения принципа симметрии при синтезе генераторов электрических сигналов и измерительных преобразователей. Показано, что синтез таких систем выполняется путём обращения определённых операторов элементов системы: комплексных передаточных, амплитудно-частотных, фазово-частотных или амплитудных характеристик. Предлагаемый метод продемонстрирован для синтеза колебательных систем генераторов электрических сигналов, однако он может найти применение при анализе любых циклических процессов.*

**Ключевые слова:**

*Принцип симметрии, измерительный преобразователь, прямое преобразование, обратное преобразование, колебательная система, активный нелинейный элемент, условия баланса амплитуд и баланса фаз.*

**Key words:**

*Symmetry principle, converter measurement, inverse transformation, the oscillating system, active nonlinear element, balances of amplitude and phase.*

**Введение**

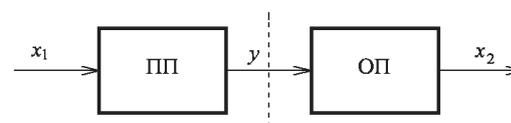
Принцип симметрии нашёл широкое применение в геометрии, теории дифференциальных уравнений, физике [1–3] и т. д. В любой области естествознания он позволяет создать новые решения и находить новые закономерности. Применение принципа симметрии к синтезу структур измерительных преобразователей рассмотрено в работе [4]. В этой статье обсуждаются применения принципа симметрии для синтеза структур генераторов электрических сигналов.

Вначале рассмотрим модель некоторого обобщенного преобразователя. В таком преобразователе входные сигналы множества  $X$  преобразуются в выходные сигналы множества  $Y$  под действием оператора  $A$ . Упорядоченная тройка  $(A, X, Y)$  полностью характеризует преобразование. В теории множеств функция (оператор)  $A$  каждому элементу множества  $X$  сопоставляет один элемент множества  $Y$ . Эта тройка связана прямым или, если существует обратный оператор, обратным уравнениями

$$Y = AX, \quad X = A^{-1}Y. \quad (1)$$

В качестве величин  $X$  и  $Y$  могут быть числа, функции, а в качестве оператора  $A$  – функции, функционалы или функциональные операторы. Уравнения (1) описывают один и тот же преобра-

зователь. Если же, наоборот, величины  $Y$  рассматривать как входные, а  $X$  как выходные, то можно записать аналогичные уравнения, описывающие обратное преобразование. На рис. 1 показано соединение прямого (ПП) и обратного (ОП) преобразователей.



**Рис. 1.** Взаимно обратные преобразования в системе обработки сигнала

Величины  $x_1$  и  $x_2$  это любые физические величины, в том числе напряжения и токи. Эти величины связаны прямыми и обратными уравнениями:

$$\begin{cases} y = Ax_1; \\ x_1 = A^{-1}y; \end{cases} \quad \begin{cases} x_2 = By; \\ y = B^{-1}x_2. \end{cases} \quad (2)$$

Если оператор обратного преобразования  $B$  равен  $B = A^{-1}$ , то уравнения обратного преобразователя по форме совпадают с уравнениями прямого преобразователя, более того, если сигнал с выхода ПП подать на вход ОП, то на выходе последнего получится точная копия входного сигнала ПП. На рис. 1 показан такой случай. На рисунке вели-