Сведения об авторах

Скипин Леонид Николаевич, *д. с.-х. н., профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень, тел. 89129924555, e-mail: lke@tgasu.ru*

Храмцов Николай Васильевич, *д. т. н., профессор кафедры «Строительные процессы, основания и фундаменты», Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень*

Петухова Вера Сергеевна, *аспирант кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень, тел. 89058223239, e-mail: lke@tgasu.ru*

Митриковский Александр Яковлевич, *к. с.-х. н., доцент кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень, тел. 89058223239, e-mail: lke@tgasu.ru*

Козина Юлия Александровна, *соискатель кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень, e-mail: lke@tgasu.ru*

Skipin L. N.*, Doctor of Sciences in Agriculture, professor, head of the chair «Technosphere safety», Tyumen State Architectural and Building University, phone: 89129924555, e-mail: lke@tgasu.ru*

Khramtsov N. V.*, Doctor of Technical Sciences, professor of the chair «Construction operations, substructures and foundations», Tyumen State Architectural and building University*

Petukhova V. S.*, postgraduate of the chair «Technosphere safety», Tyumen State Architectural and Building University, phone: 89058223239, e-mail: lke@tgasu.ru*

Mitrikovsky A. Ya.*, Candidate of Sciences in Agriculture, associate professor of the chair «Technosphere safety», Tyumen State Architectural and Building University, phone: 89058223239, e-mail: lke@tgasu.ru*

Kozina Yu. A., *applicant for a scientific degree of the chair «Technosphere safety», Tyumen State Architectural and Building University, e-mail: lke@tgasu.ru*

Информационные технологии

УДК 621.311:621.313

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УСТАВОК ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

FEATURES OF DISTANCE PROTECTION SETTINGS CALCULATION

Е. П. Власова, Ф. А. Лосев
E. P. Vlasova, F. A. Losev

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***релейная защита, оптимальные параметры характеристик измерительного органа, повышение чувствительности дистанционной защиты***
Key words: ***relay protection, optimal parameters of measuring element characteristics, improvement of distance protection sensitivity***

Ведущие производители микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) выпускают терминалы дистанционной защиты линий электропередачи; поскольку разные концы линии электропередачи напряжением 35–220 кВ принадлежат разным энергетическим предприятиям, то, как правило, для защиты линии применяются терминалы различных фирм-производителей с разными характеристиками и параметрами настройки этих защит. В России расчет параметров срабатывания таких защит зачастую выполняют по разным методикам для каждого из терминалов, установленных на концах защищаемой линии электропередач, в связи с этим использование методик расчета дистанционных защит (ДЗ) усложняется из-за отсутствия универсального алгоритма. Например, методика расчета уставок цифровых дистанционных защит ООО НТЦ «Механотроника» (г. Санкт-Петербург) предлагает определить полные сопротивления срабатывания трех ступеней ДЗ и уставки по активному сопротивлению дуги и для защиты от двойных замыканий на землю [1]. Группа компаний «ABB» рассматривает вопросы расчетов и выбора уставок функций РЗА с учетом токов нулевой последовательности и взаимоиндукции нулевой последовательности для параллельных линий, а также линий, имеющих общий коридор с другими воздушными линиями [2]. В результате проведенного анализа литературных источников, методик расчета уставок дистанционных защит отечественных и зарубежных фирм были определены их достоинства и недостатки.

Существенным преимуществом дистанционных защит является стабильность зоны первой ступени. Поэтому и вторые ступени дистанционных защит обладают большими коэффициентами чувствительности. Третьи ступени всех защит отстраиваются от нагрузочных режимов. Токи срабатывания третьих ступеней токовых и токовых направленных защит должны быть больше рабочих максимальных. Минимальные токи срабатывания третьих ступеней дистанционных защит $I_{с.з.min} < I_{раб.max}$, так как при этом значительное напряжение $U_{раб}$ препятствует срабатыванию измерительного органа сопротивления третьей ступени. Чувствительность третьих ступеней дистанционных защит при использовании специальных характеристик срабатывания существенно выше [3].

К числу недостатков дистанционных защит можно отнести представленные ниже особенности.

- Невозможность обеспечения мгновенного отключения короткого замыкания (КЗ) в пределах всей защищаемой линии, поэтому они не могут служить основными защитами на тех участках сети, где необходимо выполнение этого требования.
- Реагируют на качания и нагрузку, то есть необходимость отстройки от последней существенно ограничивает чувствительность защиты и понижает ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков, а возможность действия при качаниях вынуждает усложнять защиту применением блокировки.
- Возможность ложной работы при неисправностях в цепях напряжения, что уменьшает их надежность и вызывает необходимость применения соответствующей блокировки.

Таким образом, необходимо повысить чувствительность дистанционной защиты и ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков и разработать универсальную методику расчета уставок дистанционной защиты для определения оптимальных параметров характеристик измерительного органа.

Особенность цифровых защит заключается в том, что уставки по полному сопротивлению, по углу линии и по активному сопротивлению задаются раздельно. Рассмотрим характеристику измерительного органа, которая задает уставки в прямом и обратном направлении, что уменьшает влияние качаний и нагрузки на чувствительность защиты (рис.1).

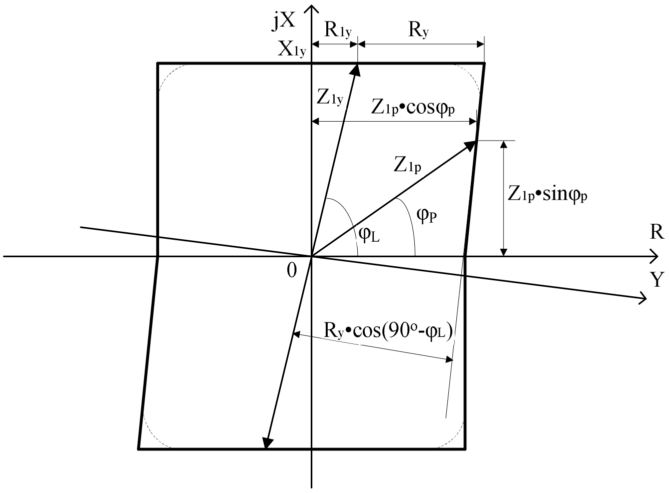

Рис. 1. ***Общий вид характеристики срабатывания дистанционных измерительных органов полного сопротивления одной из ступеней***

Уставки в прямом, обратном направлении или ненаправленные устанавливаются независимо для каждой отдельно взятой зоны [2]. В сетях с двухсторонним питанием и кольцевых сетях обычно используются направленные зоны дистанционной защиты. Для характеристик зон, направленных в прямом направлении, граничные линии направленности регулируются во II квадранте в диапазоне $90 \div 175^0$ и в IV квадранте регулируются в диапазоне $5 \div 45^0$. Значения уставок в направлении активных сопротивлений *R* и реактивных сопротивлений *X* определяют, пересекается ли граничная линия направленности во втором квадранте с линией, параллельной оси *R*, или с линией, параллельной вектору полного сопротивления *Z*. Значения уставок по активному и реактивному сопротивлениям для отдельной зоны являются одинаковыми в прямом и обратном направлении, как и для режима ненаправленной работы. Например, фирма АВВ рекомендует для первой зоны, чтобы отношение *R/X* не превышало 3 для междуфазных органов и 4,5 — для однофазных органов.

Расчет сопротивлений дистанционной защиты [4]. *Сопротивление срабатывания первой ступени* отстраивается от тока короткого замыкания на шинах подстанции (ПС), примыкающей к противоположному концу линии (рис. 2).

$$Z^{I}_{с.з1} \le k^{I}_{ОТС} \cdot Z_{л1}, \tag{1}$$

где $Z_{л1}$ — сопротивление линии; $Z^{I}_{с.з1}$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты; $k^{\mathrm{I}}_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки первой ступени.

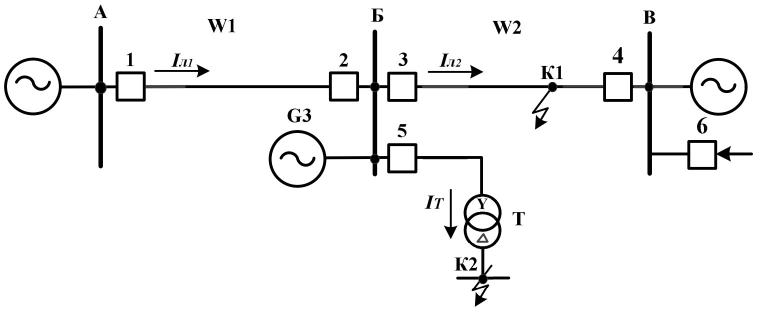

Рис. 2. ***Схема сети***

Сопротивление срабатывания для второй ступени выбирается таким образом, чтобы надежно охватить конец защищаемого участка, не охватываемый ступенью I, и резервировать с выдержкой времени ступени II действие ступени I защиты соседнего участка в начале линии [5].

$$Z^{II}_{с.з1} \le k^{II}_{ОТС} \cdot (Z_{л\text{-}1} + \frac{k^{I}_{ОТС}}{k_{T\,II}} \cdot Z^{I}_{с.з.п}), \tag{2}$$

где $Z_{л\text{-}1}$ — сопротивление линии 1; $Z^{II}_{с.з1}$ — сопротивление срабатывания второй ступени ДЗ; $Z^{I}_{с.з.п}$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты смежной линии; $k_{\mathrm{Т.II}}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите к току в рассматриваемом участке; $k^{\mathrm{I}}_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки первой ступени; $k^{\mathrm{II}}_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки второй ступени.

Отстройка от тока короткого замыкания на шинах низшего (среднего) напряжения ПС:

$$Z^{II}_{с.з1} \le k^{II}_{ОТС} \cdot (Z_{л\text{-}1} + \frac{Z_{TP}}{k_{T\,TP}}), \tag{3}$$

где $Z_{л\text{-}1}$ — сопротивление линии 1; $Z^{II}_{с.з1}$ — сопротивление срабатывания второй ступени ДЗ; $Z_{тр}$ — минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающих трансформаторов на подстанции; $k_{Т.ТР}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите к току в рассматриваемом участке; $k^{II}_{отс}$ — коэффициент отстройки второй ступени.

Для одиночных линий 35–220 кВ при применении для защиты трансформаторов подстанции, примыкающей к противоположному концу защищаемого участка, токовой отсечки (а не дифференциальной защиты), вторую ступень рассматриваемой ДЗ целесообразно согласовывать с токовой отсечкой вместо отстройки от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции.

Согласование с токовой отсечкой производят аналогично тому, как согласовывают уставку второй ступени ДЗ с уставкой токовой отсечки, являющейся первой ступенью защиты предыдущего участка линии [1].

Согласование уставки второй ступени ДЗ с уставкой первой ступени защиты предыдущего участка (при выполнении последней с помощью токовой отсечки, отсечки по напряжению или комбинированной отсечки по току и напряжению) производят по выражению, аналогичному (2):

$$Z^{II}_{с.з1} \le k_{отс} \cdot (Z_{л\text{-}1} + \frac{Z_{расч}}{k_T}), \qquad (4)$$

где $Z_{л\text{-}1}$ — сопротивление участка, на котором установлена согласуемая защита; $Z_{расч}$ — сопротивление зоны, охватываемой защитой, с которой производят согласование в расчетных для согласования условиях при металлическом КЗ; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки; $k_{Т}$ — коэффициент токораспределения в расчетных для согласования условиях.

При выполнении первой ступени защиты предыдущего участка с комбинированной отсечкой по току и напряжению уставка ДЗ должна быть согласована с уставками токового органа и органа напряжения комбинированной отсечки в отдельности. Условию согласования будет удовлетворять меньшее из полученных сопротивлений, поскольку зона работы комбинированного органа определяется наименьшей из зон срабатывания токового органа и органа напряжения.

Согласование уставок ДЗ с уставками токовой отсечки или токового органа комбинированной отсечки по току и напряжению выполняют для КЗ между двумя фазами. Вызвано это тем, что при данном КЗ ток обычно меньше, чем при других многофазных КЗ, а следовательно, меньше и сопротивление зоны, контролируемой токовым реле.

Расчетный режим работы сети: ток в месте установки защиты, с уставкой которой производят согласование, наименьший; ток в месте установки согласуемой защиты — по возможности наибольший.

Согласование уставок ДЗ с уставками отсечки по напряжению или органа напряжения комбинированной отсечки по току и напряжению выполняют для любого многофазного КЗ.

Сопротивление зоны, надежно контролируемой измерительным органом напряжения, не зависит от вида многофазного КЗ.

Расчетный режим работы сети — ток в месте установки согласуемой ДЗ наибольший.

Выдержку времени второй ступени ДЗ при выборе сопротивления срабатывания по указанным выше условиям принимают на ступень Δt больше выдержки времени:

- быстродействующей защиты предыдущего участка, с которой производят согласование;
- защит без выдержки времени, установленных на трансформаторах подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу защищаемого участка.

Коэффициент чувствительности $k_ч$ второй ступени ДЗ необходимо проверять при металлическом КЗ в конце защищаемого участка [3]:

$$k_ч = \frac{Z^{II}_{с.з1}}{Z_{л1}} \qquad (5)$$

где $Z_{л1}$ — сопротивление линии; $Z^{I}_{с.з1}$ — сопротивление срабатывания первой ступени ДЗ; $k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Минимальное значение коэффициента чувствительности может быть: *1,25* — при использовании двух либо трех ступеней ДЗ, применяемой в качестве резервной; *1,50* — при использовании двух либо трех ступеней ДЗ, применяемой в качестве основной.

В тех случаях, когда коэффициент чувствительности второй ступени ДЗ меньше требуемого, сопротивление срабатывания и выдержку времени ДЗ необходимо уточнить, учитывая изложенное ниже. Если сопротивление срабатывания согласовывали с первой ступенью защиты предыдущего участка, то необходимо согласовать его со второй ступенью этой же защиты. Если сопротивление срабатывания выбирали по условиям отстройки от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу защищаемого участка, то необходимо его согласовать с уставкой быстродействующей защиты элементов стороны низшего (среднего) напряжения рассматриваемой подстанции [4].

Если сопротивление срабатывания выбирали исходя из отстройки от токов КЗ на шинах подстанции, примыкающей к дальнему (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу предыдущего участка, то его необходимо согласовать со второй ступенью защиты предыдущего участка как при включении защиты на ток одной линии, так и на сумму токов двух параллельных линий.

Если и в этом случае уставка не удовлетворяет требованию чувствительности или вторая ступень защиты предыдущего участка имеет большую выдержку времени, и, следовательно, согласование с ней приведет к чрезмерному увеличению времени действия второй ступени защищаемого участка, то при наличии специальной защиты шин условие отстройки от токов КЗ на шинах подстанции, примыкающей к дальнему концу предыдущего участка, допустимо не учитывать.

В этом случае сопротивление срабатывания рассматриваемой ступени защиты принимают исходя из условия обеспечения минимального значения коэффициента чувствительности $k_ч$.

Третьи ступени дистанционных защит отстраиваются от нагрузочных режимов.

Так как защита реагирует на качания и нагрузку, то есть необходимость отстройки от последней существенно ограничивает чувствительность защиты и понижает ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков, то возможность действия при качаниях вынуждает усложнять защиту применением блокировки.

Сопротивление срабатывания третьей ступени. Для исключения срабатывания измерительного органа сопротивления в нагрузочных режимах его сопротивление срабатывания должно быть меньше минимального рабочего сопротивления:

$$Z^{III}_{с.з} < Z_{раб.\min}. \qquad (6)$$

Измерительный орган третьей ступени, сработавший при КЗ на смежном участке, должен вернуться в исходное положение после отключения КЗ выключателем поврежденного участка:

$$Z^{III}_{с.з} = Z_{раб.\min} / \left(k^{III}_{ОТС}\, k_З\, k_В\right), \qquad (7)$$

где $Z_{раб.\min} = U_{раб\,\min} / I_{раб\,\max}$ — минимальное сопротивление на входе защиты в нагрузочном режиме; $U_{раб\,\min}, I_{раб\,\max}$ — минимальное напряжение и максимальный ток; $k^{\text{III}}_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки третьей ступени; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата; $k_{з}$ — коэффициент запуска больше единицы.

По условию повышения чувствительности дальнего резервирования определяем сопротивление измерительных органов для определения обратного направления КЗ:

$$X^{III}_{\text{с.з1}} = 1{,}2 \cdot (X^{II}_{\text{с.з1}} - X_{л}), \tag{8}$$

где $X^{III}_{\text{с.з.1}}$— реактивное сопротивление срабатывания третьей ступени ДЗ; $X^{II}_{\text{с.з.1}}$ — реактивное сопротивление срабатывания второй ступени ДЗ; $X_л$ — реактивное сопротивление линии.

$$R^{III}_{с.з1} = 1{,}2 \cdot (R^{II}_{с.з1} - R_{л}), \tag{9}$$

где $R^{III}_{с.з1}$— активное сопротивление срабатывания третьей ступени ДЗ; $R^{II}_{с.з1}$— активное сопротивление срабатывания второй ступени ДЗ; $R_л$ — активное сопротивление линии.

Условие отстройки от максимальных перетоков реактивной и активной мощности необходимо для согласования с защитами смежных элементов сети, а также для обеспечения дальнего резервирования защит на смежных присоединениях. Для ВЛ большой протяженности дополнительно требуется проверка выполнения условия отстройки от стока реактивной зарядной мощности линии, при этом в качестве расчетного режима рассматривается режим одностороннего включения ВЛ при отсутствии шунтирующих реакторов на ней. Величина емкостного тока может быть определена по выражению

$$\underline{I}_{C} = \underline{U}_{ф\max} \cdot b_1 \cdot l, \tag{10}$$

где $\underline{I}_{C}$ — емкостной ток, кА; $\underline{U}_{ф\max}$ — максимальное допустимое фазное рабочее напряжение, кВ; b_1 — удельная емкостная проводимость линии l, сим/км; l — длина линии, км.

Соответственно, минимальный замер по полному сопротивлению при стоке реактивной мощности в месте установки защиты

$$\underline{Z}^{III}_{с.з1} = \frac{\underline{U}_{ф}}{\underline{I}_{C}}, \tag{11}$$

где $\underline{Z}^{III}_{с.з1}$ — полное сопротивление срабатывания третьей ступени ДЗ.

Тогда значение реактивного сопротивления срабатывания:

$$X^{III}_{с.з1} = k^{III}_{отс} \cdot \left| Z^{III}_{с.з1} \cdot \sin \varphi^{III}_{р} \right|, \tag{12}$$

где $Z^{III}_{с.з1}$ — модуль полного сопротивления срабатывания третьей ступени ДЗ; $\sin \varphi^{III}_{р}$ — синус угла полного сопротивления.

Необходимо также учитывать значение коэффициента компенсации токов замыкания на землю k_0 для измерительной системы фаза-земля [6]. При его учете защитой определяются одни и те же сопротивления при междуфазных замыканиях и замыканиях на землю. Коэффициент k_0 для соответствующей ступени дистанционной защиты определяют по выражению:

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}, \tag{13}$$

где Z_1 и Z_0 — сопротивления прямой и нулевой последовательностей защищаемого участка линии, Ом.

Дополнительным условием является выбор поврежденных фаз при замыканиях на землю (однофазное или двухфазное КЗ). При однофазных КЗ должны выполняться обязательные критерии:

- аварийные составляющие токов в неповрежденных фазах не должны превышать определенного значения тока КЗ:

$$I_{ав} \le k_0 3I_0, \qquad (14)$$

где I_0 — ток нулевой последовательности;

- угол между аварийными составляющими токов неповрежденных фаз не должен превышать определенного значения.

Невыполнение данных критериев определяет двухфазное КЗ на землю [5].

Для уменьшения числа ложных срабатываний дистанционных защит в алгоритм работы включены блокировки при качаниях БК и блокировки при неисправностях в цепях напряжения БН [3].

Блокировки при качаниях предназначены для предотвращения ложных и излишних срабатываний защиты. Алгоритмы их должны учитывать следующие требования: запрещать защите срабатывать при качаниях без КЗ и при внешних КЗ (если там работают свои защиты); при КЗ на защищаемом участке должна быть обеспечена возможность срабатывания защиты как при отсутствии, так и при возникновении качаний.

Блокировки при качаниях должны различать режимы КЗ и качаний: возникновение КЗ в системе характеризуется появлением (хотя бы кратковременным) несимметрии, качания же являются симметричным режимом; при возникновении КЗ и при качаниях скорость изменения действующих значений электрических величин различна: малые промежутки времени приращения электрических величин при КЗ значительно больше, чем при качаниях.

В цепях измерительных трансформаторов напряжения возможны неисправности, при которых исчезает напряжение, подводимое к защите: обрывы цепей, их замыкание, срабатывание автоматов или перегорание предохранителей, ошибки персонала.

При неисправностях могут отказывать одни измерительные органы и ложно срабатывать другие. Для обнаружения этих неисправностей используются блокировки при неисправностях в цепях напряжения (БН). При обнаружении неисправности БН либо выводит защиту из действия (если она может ложно сработать на отключение), либо действует на сигнал. К БН предъявляются требования: срабатывать при любой неисправности во вторичных цепях трансформатора напряжения, не срабатывать при КЗ в первичных цепях, обладать быстродействием (большим, чем защита), если требуется выводить защиту.

В настоящее время схемы строятся таким образом, что БК вводит логическую часть защиты в работу, как принято говорить, пускает защиту. Поэтому часто БК называют пусковым органом. При использовании в БК измерительных органов тока обратной последовательности при неисправностях в цепях напряжения защита не будет введена в работу, что исключает ее ложное срабатывание. Этим объясняется то, что БК вводит все ступени, даже отстроенные от качаний по времени. К БН предъявляется требование лишь подавать сигнал о неисправности, а значит, не является актуальным быстродействие БН. При использовании в БК измерительных органов напряжения обратной последовательности защита при неисправностях в цепях напряжения будет введена, что может привести к ее ложному срабатыванию. Поэтому требуются БН с высоким быстродействием для обеспечения вывода защиты. В общем случае схемы строятся таким образом, что для действия защиты на отключение необходима информация БК и БН.

Блокировки при качаниях препятствуют ложному срабатыванию защиты при качаниях мощности в электроэнергетической системе и при КЗ на смежных участках.

Блокировки при неисправностях в цепях напряжения предотвращают ложные срабатывания и несрабатывания дистанционных защит при неисправностях во вторичных цепях трансформаторов напряжения. Использование в схемах дистанционных защит БК и БН повышает надежность работы ДЗ, также препятствует ложному срабатыванию защиты, улучшает ее селективность.

Таким образом, рекомендованная методика расчета уставок цифровых дистанционных защит линий электропередачи, с учетом блокировки при качаниях и при неисправностях в цепях напряжения, обеспечивает надежность и селективность дистанционных защит.

Список литературы

1. СТО ДИВГ-053-2012. Линии электропередач 35–220 кВ. Дистанционная защита. Методика расчета уставок защит. – СПб: НТЦ Механотроника, 2012. – 52 с.

2. Рекомендации по выбору уставок дистанционных защит от всех видов КЗ и токовых защит терминала rel 670.v1– Киев, 2006. – 114 с.

3. Басс Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем / Под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Из-во МЭИ, 2002. – 296 с.

4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

5. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

6. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита. Принципы и применение / Пер. с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.

Сведения об авторах

Власова Екатерина Петровна, *к. т. н., доцент кафедры «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: vlasova_ep@tsogu.ru.*

Лосев Федор Алексеевич, *магистрант кафедры «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: fedor_los@mail.ru.*

Vlasova E. P., *Candidate of Technical Sciences, associate professor of the chair «Electric power engineering», Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: vlasova_ep@tsogu.ru.*

Losev F. A., *postgraduate of the chair « Electric power engineering», Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: fedor_los@mail.ru.*