

Токовая защита четырех параллельных линий электропередач

КЛЕЦЕЛЬ М.Я., МАШРАПОВ Б.Е.

Релейная защита четырех параллельных линий в ряде случаев характеризуется недостаточной чувствительностью из-за необходимости отстраиваться от режимов нагрузки, и недостаточной надежностью из-за использования цепей напряжения. Для повышения надежности можно использовать мажорирование при построении защит, а для достижения максимального эффекта три дублирующие друг друга защиты должны иметь разные принципы действия. Предлагается защита, которая выбирает максимальный из токов одноименных фаз четырех линий, фиксирует разности между максимальным током и токами в этих же одноименных фазах первой, второй, третьей и четвертой линий, и если какая-то разность, например между максимальным током и током в фазе первой линии меньше заданного значения, а ток хотя бы в одной из одноименных фаз других линий больше тока холостого хода, то отключают первую линию. Приведены структурные схемы алгоритмов ее функционирования для сетей с заземленной и изолированной нейтралью, которые легко реализуются на микропроцессорах. Проанализирована работа в различных режимах. Показано, что чувствительность защиты не зависит от токов нагрузки и токов в неповрежденных фазах. Выполнен расчет зоны каскадного действия, которая меняется в пределах 6–11% в зависимости от количества включенных линий.

Ключевые слова: линия электропередач, релейная защита, короткое замыкание, нейтраль.

Одной из причин недостаточной надежности релейной защиты является использование цепей напряжения, которое может приводить даже к техногенным авариям из-за излишнего срабатывания дистанционной защиты на параллельных линиях электропередач [1]. Как показывает анализ, в подавляющем большинстве новейших разработок этот недостаток не исключен. Внедрение защит в микропроцессорном исполнении в ближайшее время не улучшит их надежность, так как она пока не выше, чем у электромеханических и полупроводниковых защит [2]. Повысить надежность можно благодаря мажоритарному принципу

The protection of four parallel lines is indicated of inadequate sensitivity in some cases due to the need to turn away from load modes, and inadequate reliability due to the use of voltage circuits. To increase reliability is possible to use majorization in constructing protections, and to achieve maximum effect, three overlapping protections must have different principles of action. A protection is proposed that selects the maximum of the currents of the same-named phases of the four lines, fixes the differences between the maximum current and currents in the similar phases of the first, second, third and fourth lines, and if some difference, for example between the maximum current and current in the phase of the first the line is less than a predetermined value, and the current in at least one of the same phases of the other lines is greater than the idling current, then disconnect the first line. Structural schemes of its operation algorithms for networks with grounded and isolated neutral are presented, which are easily implemented on microprocessors. The work in various modes is analyzed. It is shown that the sensitivity of the protection does not depend on the load currents and currents in undamaged phases. The calculation of the zone of cascade action, which varies within 6–11%, depending on the number of lines included is given.

Key words: power line, relay protection, short-circuit, neutral.

построения защит [3]. При этом для достижения максимального эффекта дублирующие друг друга защиты должны иметь разные принципы действия. Однако в некоторых элементах электроэнергетических систем количество, как основных, так и резервных, апробированных защит, имеющих разные принципы действия, пока недостаточно, к тому же многие из них не только используют цепи напряжения, как, например, поперечная направленная защита параллельных линий или дистанционная защита, но и не всегда обладают достаточной чувствительностью из-за необходимости отстраиваться от режимов нагрузки. По-

вышение надежности и чувствительности защит особенно актуально для ответственных участков электроэнергетических систем, например, четырехцепных участков воздушных линий 110–220 кВ Москвы и Подмосковья. В статье предлагается построение релейной защиты четырех параллельных линий, не имеющих указанных выше недостатков традиционных защит.

Принцип действия. Для токов в одноименных фазах всех ЛЭП проверяется справедливость неполных неравенств [4]

$$I_p^M - I_{pn} > I_{сз} = k_1 I_{нб}; \quad (1a)$$

$$I_{pj} > k_2 I_{xyj}. \quad (1б)$$

Линия, для которой условие (1a) не выполняется, должна быть отключена.

В (1a,б) приняты следующие обозначения: I_p^M – действующее значение максимального из токов в одноименных фазах (например, в фазе А) всех линий (при КЗ на любой из линий это ток в поврежденной фазе); I_{pn} – действующее значение тока в фазе p (p принимает значения А, В, С) n -й линии ($n=1, 2, 3, 4$); I_{pj} и I_{xyj} – действующее значение тока в фазе и ток холостого хода j -й линии, причем $n \neq j$; k_1, k_2 – коэффициенты отстройки; $I_{сз}$ – ток срабатывания защиты; $I_{нб}$ – ток небаланса, приведенный к первичному току. Ток $I_{нб}$ максимален, если при внешнем трехфазном КЗ (на шинах противоположной подстанции) ток максимален, а ток I_{pj} , протекающий в одноименной фазе другой ЛЭП, минимален. Это имеет место, когда погрешности ε_1 трансформаторов тока и погрешности ε_2 реализующего устройства максимальны, как и погрешность ε_3 от разницы в сопротивлениях ЛЭП. В соответствии с существующими допущениями принимаем: $\varepsilon_1=0,1, \varepsilon_2=0,02, \varepsilon_3=0,03$ и $k_1=1,05$ (с запасом). Тогда ток срабатывания защиты

$$I_{сз} = 1,05 I_{нб} = 1,05 (I_K^\Phi (1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - I_K^\Phi (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4)) = 0,2 I_K^\Phi, \quad (2)$$

где I_K^Φ – действующее значение тока в фазах линий при трехфазном КЗ на шинах противоположной подстанции без учета погрешностей.

Программная реализация. В соответствии с условиями срабатывания, сформулированными выше, алгоритм функционирования защиты

для сетей с заземленной нейтралью, структурная схема которого для фазы А представлена на рис. 1, следующий. Вводятся токи $I_{xx1}, I_{xx2}, I_{xx3}$ и I_{xx4} холостого хода всех четырех линий, коэффициенты k_1, k_2 отстройки и ток $I_{нб}$ небаланса. Параллельно обрабатываются мгновенные значения двенадцати фазных токов $i_{A1}, i_{B1}, i_{C1}, \dots, i_{A4}, i_{B4}, i_{C4}$ линий, после цифровой фильтрации определяются их действующие значения $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}, \dots, I_{A4}, I_{B4}, I_{C4}$. Находятся максимальные токи I_A^M, I_B^M, I_C^M в каждой группе одноименных фаз. Вычисляются значения токов $I_{A11}, I_{A22}, I_{A33}, I_{A44}$ для фаз А всех линий, соответственно, (например $I_{A11} = I_A^M - I_{A1}$). Для фаз В и С вычисляются аналогичные разности, но в индексах вместо А записываются В и С. Далее ток I_{A11} сравнивается с током $I_{нб}$ в соответствии с (1a). При $I_{A11} < k_1 I_{нб}$ для каждой одноименной фазы остальных линий проверяются условия (1a,б). Если для одной из них выполняются условия (1a) и (1б), то выключатель Q_1 отключается. При $I_{A11} > k_1 I_{нб}$ с током $I_{нб}$ сравнивается ток I_{A22} . Если при $I_{A22} < k_1 I_{нб}$ для первой ЛЭП выполняется условие (1б) или для третьей или четвертой выполняются условия (1a) и (1б), то выключатель Q_2 отключается. Последовательность действий для срабатывания защиты на отключение выключателей Q_3 и Q_4 можно проследить по рис. 1. Аналогична структура алгоритма защиты для фаз В и С, но вместо индексов А записываются В и С.

В сетях с изолированной нейтралью возможны замыкания на землю разных фаз на защищаемых линиях. Поэтому алгоритм функционирования, приведенный выше, несколько изменяется (рис. 2). Дополнительно вводятся переменные w, r, g и m , и им присваивается значение «ноль». При этом $w=1$, если не выполнилось условие (1a) для одной из фаз первой линии, а для одноименной фазы любой другой линии одновременно выполняются условия (1a) и (1б). Однако при двойных замыканиях значение «1» принимает не одна переменная, а две. Поэтому, чтобы отключить только одну линию, следует задать дополнительные условия: первая линия отключается, если $w=1$; вторая – если $w=0$ и $r=1$; третья – если $w=r=0$ и $g=1$, и четвертая – если $w=r=g=0$ и $m=1$.

Чувствительность. Для защит параллельных линий чувствительность оценивается зоной

каскадного действия $I_{\text{кд}}$ ($I_{\text{кд}} = lx$, где l – длина линии, x – ее часть) и коэффициентом чувствительности пусковых органов ($k_{\text{ч}} = I_{\text{кмин}} / I_{\text{сз}}$), где $I_{\text{кмин}}$ – минимальный ток короткого замыкания в точке повреждения, находящейся в зоне каскадного действия, после отключения линии со стороны питаемой подстанции, $I_{\text{сз}}$ – ток срабатывания защиты [5]. На основе выражений (1а) и (2) определим $I_{\text{кд}}$, считая, что КЗ произошло на границе зоны каскадного действия. Тогда $I_{\text{к1}}^{\Phi} = I_{\text{к2}}^{\Phi} = 0,2 I_{\text{к}}^{\Phi}$ (где $I_{\text{к1}}^{\Phi}$ и $I_{\text{к2}}^{\Phi}$ – токи в фазах первой и второй линий при КЗ на первой). При этом ток к месту КЗ подтекает по двум ветвям: по поврежденной линии; по неповрежденным одной, двум или трем линиям и по участку поврежденной линии с другой ее стороны. Ток в первой ветви $I_{\text{к1}}^{\Phi} = E / (l - l_{\text{кд}}) z_0$, во второй – $E / \left(\frac{l}{3} - l_{\text{кд}} \right) z_0$ (n – общее число параллельных линий; z_0 – удельное сопротивление линии; E – ЭДС источника питания). Ток в неповрежденной линии – $I_{\text{к2}}^{\Phi} = E / (l + 3l_{\text{кд}}) z_0$. Ток в фазах линий при КЗ на шинах противоположной подстанции – $I_{\text{к1}}^{\Phi} = E / l z_0$. Исходя из изложенного, получаем:

$$\frac{1}{1-x} - \frac{1}{1+3x} = 0,2. \quad (3)$$

Рассматривая (3) как уравнение относительно x , находим, что $x = 0,06$. При включенном состоянии только двух или трех линий зона каскадного действия рассчитывается аналогично и составляет 11 и 8% длины линии, соответственно. При использовании более точных датчиков тока зона уменьшается, например, при погрешностях датчика, равной 2%, $x = 0,02$.

Быстродействие. Покажем, что защита является быстродействующей. Исходя из изложенного выше, для выполнения защиты необходимо провести 110 операций (простых вычислений и сравнений), например, при использовании микроконтроллера AT32UC3A3128 с частотой 84 МГц для их реализации понадобится 1,3 мкс. Поэтому быстродействие защиты в основном определяется временем срабатывания ее исполнительного органа.

Анализ работы. Рассмотрим работу защиты в сетях с заземленной и изолированной ней-

тралями при выполнении защиты на микропроцессорах. Пусть между фазами A и B в сети с заземленной нейтралью произошло КЗ на первой линии в зоне каскадного действия защиты. После ее отключения со стороны питаемой подстанции токи I_A^M и I_B^M равны, соответственно, I_{A1} и I_{B1} . Поэтому для этих фаз не выполняется условие (1а). Далее проверяется выполнение условий (1а) и (1б) для фаз A и B второй линии. Токи в этих фазах больше токов холостого хода, но меньше токов в одноименных фазах первой ЛЭП. Поэтому неравенства (1а) и (1б) выполняются, и выключатель Q_1 отключается. При однофазном КЗ, например фазы A , на второй линии и отключенном состоянии первой, условие (1а) не выполняется только для второй линии (для токов в третьей линии имеют место оба неравенства (1а) и (1б), так как $I_A^M = I_{A1}$), поэтому отключается выключатель Q_2 . При двухфазном КЗ в сети с изолированной нейтралью, например между фазами A и C , на первой линии токи I_A^M и I_C^M равны, соответственно, I_{A1} и I_{C1} , поэтому для токов в этих фазах условие (1а) не выполняется. Далее проверяется выполнение условий (1а) и (1б) для токов в фазах A и C второй линии. Токи в них больше токов холостого хода и меньше токов в одноименных фазах, и w принимает значение «1» (рис. 2); выключатель Q_1 отключается. Работа защиты в других режимах анализируется аналогично.

Отметим, что в тех случаях, когда не допускается работа двумя линиями, предлагаемую защиту можно установить и с приемной стороны. В этом случае, например, при КЗ между фазами A и B на первой линии при включенном состоянии четырех линий $I_A^M = I_{A1} = I_{A2} + I_{A3} + I_{A4}$, $I_B^M = I_{B1} = I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}$, и для токов в этих фазах первой линии выполняется условие (1а), а для токов в одноименных фазах остальных линий – (1б). Поэтому защита срабатывает и подает сигнал на отключение выключателя с приемной стороны первой линии. При работе тремя линиями, например, при отключенном состоянии четвертой и КЗ на первой между фазами A и B , $I_A^M = I_{A1} = I_{A2} + I_{A3}$, $I_B^M = I_{B1} = I_{B2} + I_{B3}$ и условия срабатывания выполняются. При включенном состоянии только двух линий и при КЗ на одной из них защита не срабатывает, так как токи в обеих линиях равны.

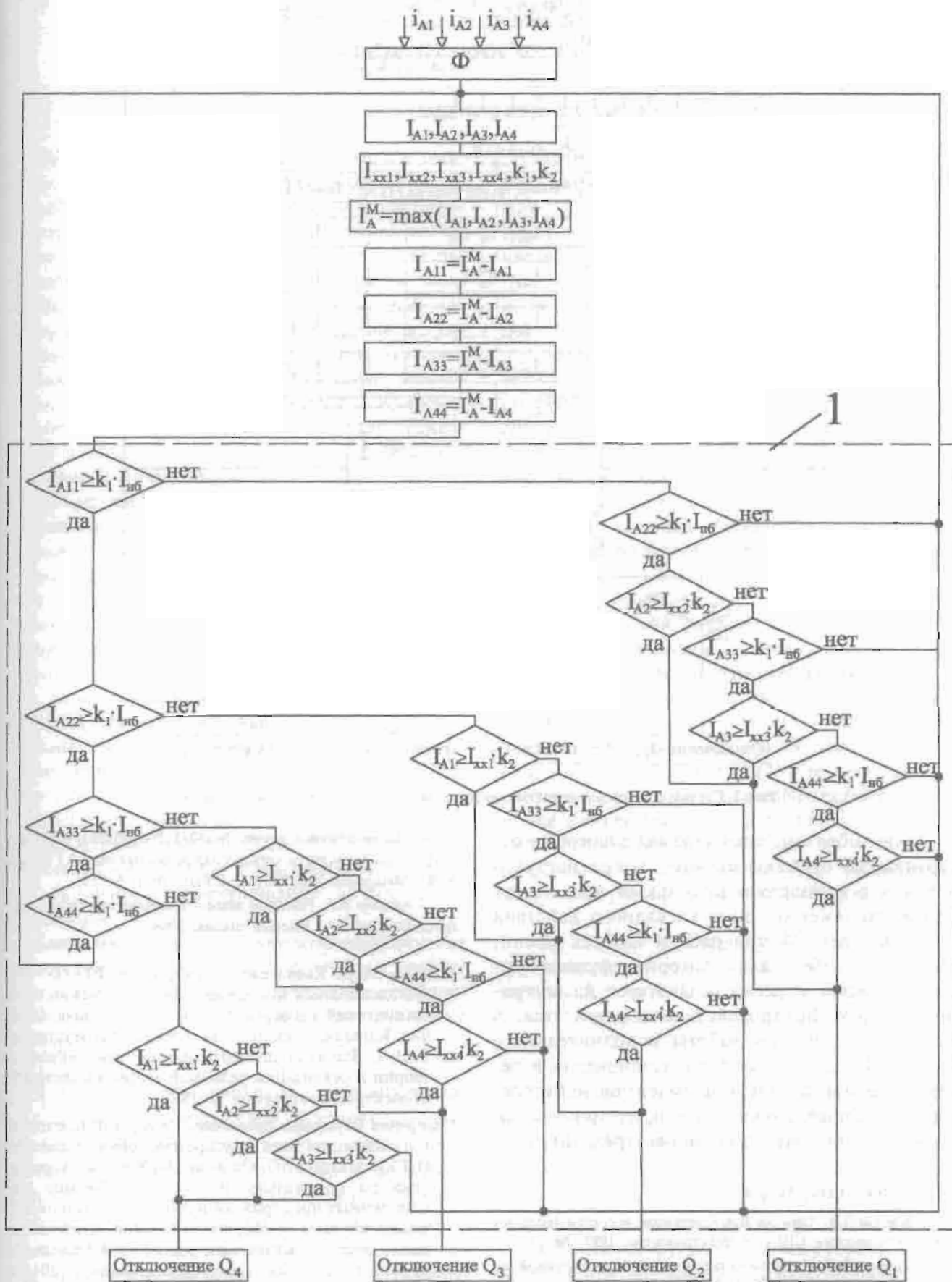


Рис. 1. Структурная схема алгоритма защиты для фазы А в сетях с заземленной нейтралью

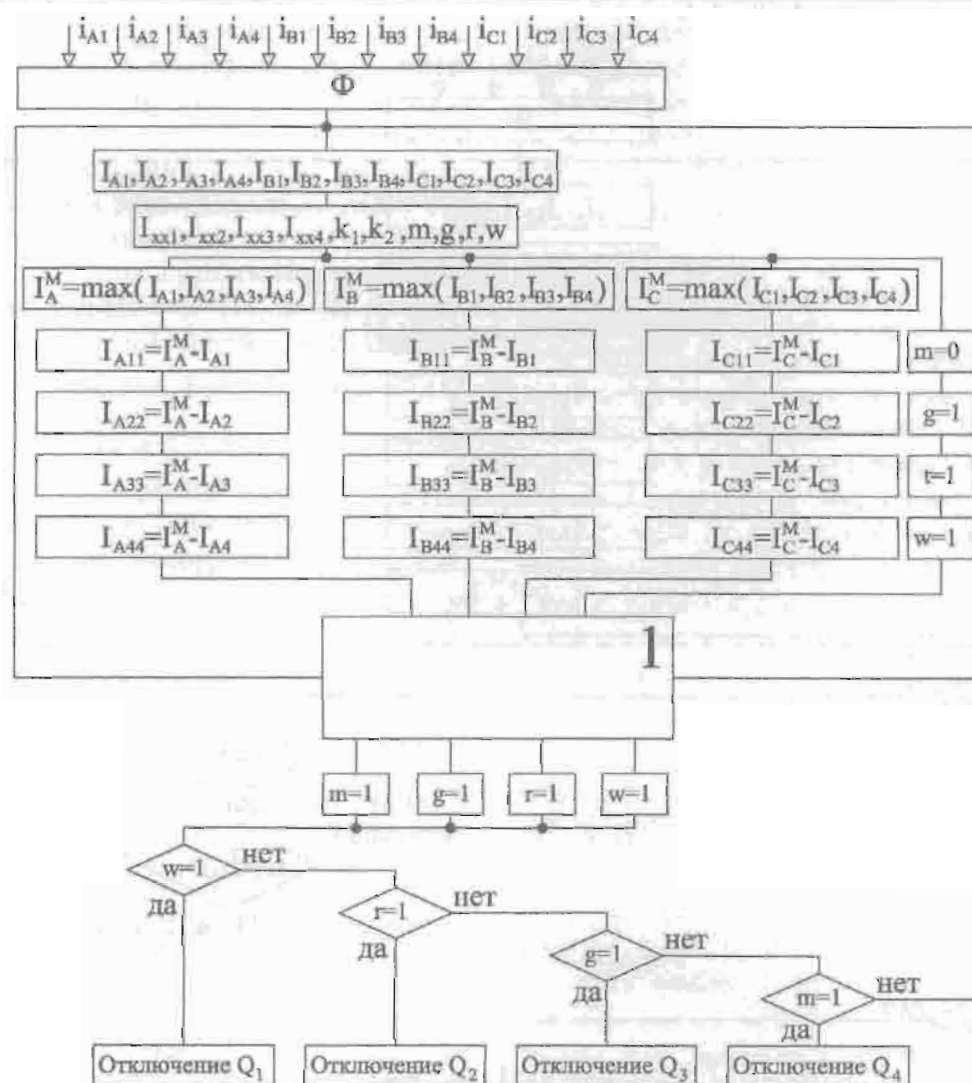


Рис. 2. Структурная схема алгоритма защиты для сети с изолированной нейтралью

Таким образом, предлагаемая защита не отстраивается от максимальных токов нагрузки и токов в неповрежденных фазах и не имеет цепей напряжения. Зона каскадного действия не превышает 6% при работе четырех линий, 8% – трех, 11% – двух. Алгоритм функционирования защиты легко реализуется на микропроцессорах. Быстродействие определяется, в основном, временем работы исполнительного органа. Защита может быть установлена в сетях с изолированной и заземленной нейтралью с питающей стороны, а с приемной – если постоянно включены не менее трех линий.

Список литературы

1. Кошечев Л.А., Семенов В.А. Системные аварии в Западном энергообъединении США // Электричество. 1997. № 10.
2. Гуревич В.И. Проблемы оценки надежности релейной защиты // Электричество. 2011. №2.
3. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. Инновационный патент №28011 Республики Казахстан. Устройство для защиты четырех параллельных линий / Клецель М.Я., Машрапов Б.Е. Оpubл. в бюл. 2013. № 12.

5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2008.

Клецель Марк Яковлевич – профессор ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» доктор техн. наук. Окончил Карагандинский политехнический институт в 1961 г. Защитил диссертацию по теме «Развитие теории и реализации релейной защиты подстанций с электродвигателями» в 1998 г.

Машрапов Бауыржан Ерболович – старший преподаватель Павлодарского государственного университета (ПГУ), доктор Ph.D. Окончил ПГУ им. С. Торайгырова по специальности Электроснабжение промышленных предприятий в 2009 г. Защитил диссертацию по теме «Совершенствование релейной защиты ячеек комплектных распределительных устройств и мощных электродвигателей» в 2014 г.