УДК 621.311

Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате

Р.В.КЛЮЕВ[1]✉, **И.И.БОСИКОВ**[2], **О.А.ГАВРИНА**[2]
[1] *Московский политехнический университет, Москва, Россия*
[2] *Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Клюев Р.В. Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате / Р.В.Клюев, И.И.Босиков, О.А.Гаврина // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 300-311. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14

Аннотация. В работе приведены результаты построения эффективной релейной защиты в системе электроснабжения горно-металлургического комбината (ГОК). Дана краткая характеристика ГОК, приведены схемы электроснабжения и замещения, используемые для расчета токов короткого замыкания. Выполнен статистический анализ повреждений в электрической сети ГОК, позволяющий сделать выводы о характере распределения повреждений. Анализ зарегистрированных повреждений показывает, что их значительная часть – это однофазные замыкания на землю, которые в большинстве случаев переходят в многофазные короткие замыкания, отключаемые максимальной токовой защитой. С целью повышения эффективности и надежности работы релейной защиты уточнена схема электроснабжения ГОК и проведен ее анализ. Произведен расчет токов короткого замыкания, что позволило рассчитать уставки релейной защиты и дать рекомендации по месту ее установки и настройки, чтобы обеспечить нормальную работу потребителей электроэнергии. Для уменьшения количества повреждений кабельной вставки на линии, отходящей на административно-бытовой комбинат (АБК), и увеличения надежности питания потребителей целесообразно осуществить разделение мощностей существующей линии напряжением 10 кВ на две параллельные путем прокладки второй линии. На линии, отходящей на АБК, рекомендуется установить токовую отсечку, целесообразность установки которой показали расчеты. Это уменьшит вероятность повреждаемости кабельной вставки. Данные по токам уставки максимальной токовой защиты и токовой отсечки приведены на карте селективности.

***Ключевые слова*:** горно-обогатительный комбинат; релейная защита; токи короткого замыкания; уставка; система электроснабжения; повреждения

Введение. Повышение эффективности работы предприятий возможно только при правильном использовании научно-технических решений по эксплуатации и оптимальным режимам работы системы электроснабжения (СЭС). Важное значение для оптимального режима работы СЭС имеет правильный выбор устройств релейной защиты и их настройка, приводящие к повышению селективности и надежности ее работы. При изменении нагрузки потребителей режим работы СЭС становится другим, поэтому необходимо оценить влияние нагрузки на потери в СЭС.

Постановка проблемы. Одной из наиболее важных задач для СЭС горно-обогатительных комбинатов является обеспечение эффективного функционирования систем релейной защиты и автоматики. Это необходимо для снижения отрицательного эффекта от возможных повреждений и ненормальных режимов, обусловленных короткими замыканиями. Для решения этой задачи для одного из крупнейших ГОК РФ построена эффективная релейная защита на основе проведения комплексных исследований. Внедрение рекомендаций, предложенных в работе, позволит повысить надежность и эффективность работы релейной защиты в СЭС ГОК и получить соответствующий экономический эффект.

Краткая характеристика ГОК. Электроснабжение потребителей напряжением 10 кВ ГОК осуществляется от шин подстанции 10 кВ «Промплощадка» и от центральной распределительной подстанции: ЦРП-10 кВ от двух секций шин, работающих раздельно фидерами, питающими линии на административно-бытовой комбинат (АБК) (рис.1); на подстанцию «Хрустальная»; на трансформаторную подстанцию (ТП-9); с 3-й ячейки комплектного распределительного устройства наружной установки (КРУН-10 кВ). Для примера на рис.1. приведена схема электроснабжения ГОК с питающими линиями на АБК, остальные схемы в работе не представлены.

Отходящие линии выполнены воздушными и кабельными линиями электропередачи (смешанными), что видно из схем электроснабжения. Сечение воздушных линий колеблется в незначительных пределах: АС-95 – АС-50 (А-50). Сечения кабельных линий – от 50 до 240 мм 2 марки ААШВ и АСБ. Длины участков кабельных и воздушных линий колеблются в очень широких

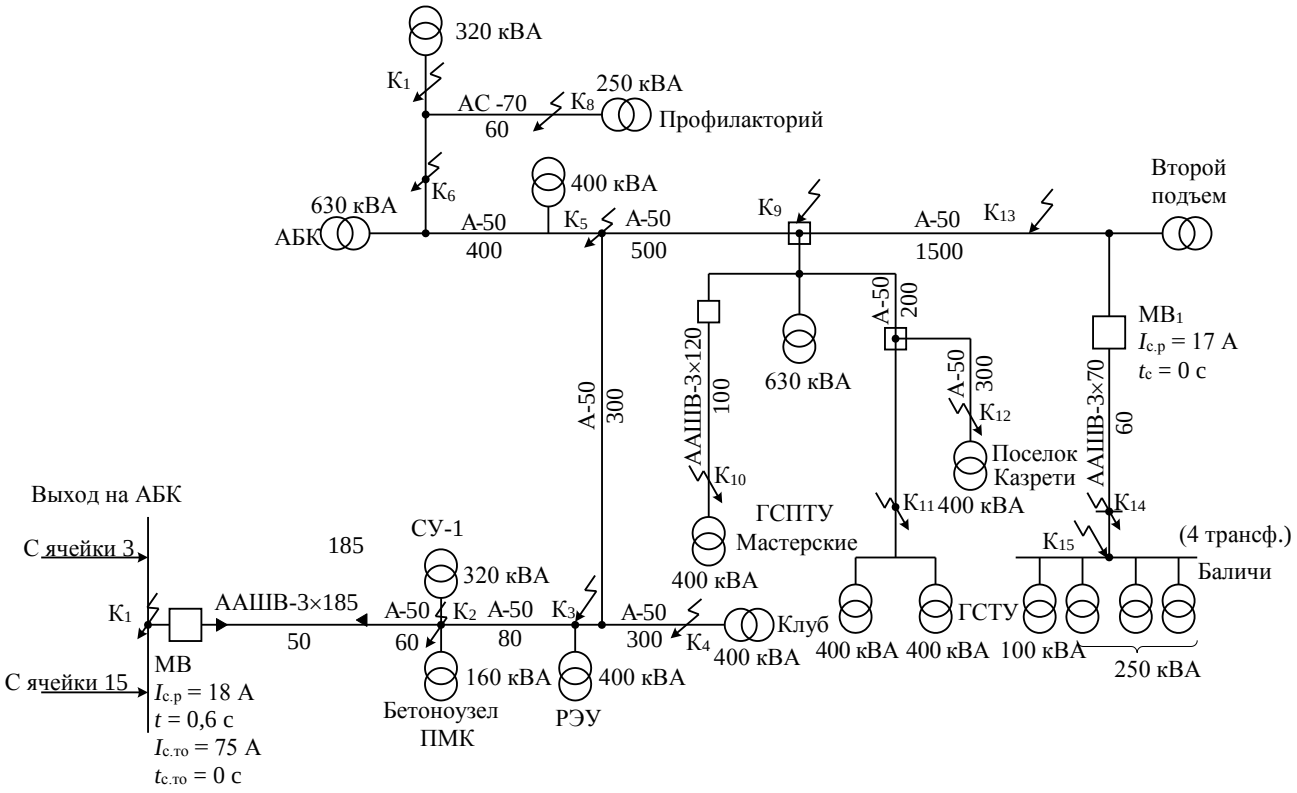


Рис.1. Схема электроснабжения ГОК с питающими линиями на АБК

пределах, в зависимости от удаленности электроприемников, подстанций и от наличия материалов на момент их строительства. Количество электроприемников, т.е. число трансформаторных подстанций на каждой линии очень значительное (до 19-20). Мощности составляют от 100 до 630 кВА.

Статистический анализ повреждений в электрической сети ГОК. Статистический материал позволяет сделать некоторые выводы о характере распределения повреждений за указанный период [8, 21]. Всего зарегистрировано 120 повреждений, из которых 58, т.е. около 50 % приходится на фидер, отходящий от ячеек 3 и 15 подстанции «Промплощадка», что является значительным для небольшого участка с большим количеством подключенных подстанций. Регистрация повреждений приведена в журнале главной понизительной подстанции (ГПП) на основании срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ), токовой отсечки (ТО) от токов короткого замыкания, а также в ходе срабатывания сигнализации земляной защиты.

Анализ показывает, что значительная часть повреждений – это однофазные замыкания на землю, которые в большинстве случаев переходят в многофазные короткие замыкания, отключаемые МТЗ [9, 18].

Графики анализа количества повреждений за указанный период (рис.2) иллюстрируют большинство повреждений по фидеру на АБК, которые приходятся на январь, апрель, май и декабрь 2017, 2018 и частично 2019 гг. Фидер ячейки 3 на хвостовое хозяйство (рис.3) иллюстрирует количество повреждений, большинство из которых приходится на февраль, апрель, май 2017 г., июнь 2018 г. и август 2019 гг.

Большое количество зарегистрированных повреждений определяется недостаточными профилактическими мероприятиями и небольшим количеством осадков за указанный период.

Причины повреждений электроустановок зависят от многих факторов и имеют разнообразный характер. Однако, из журнала учета простоя электрооборудования практически во всех случаях неясна причина повреждения и отключения элементов, только указывается, какая защита отключает повреждение. Повреждения могут быть разделены на следующие виды: пробой кабеля, повреждение изоляторов воздушной линии, обрыв воздушной ЛЭП, механическое, повреждение питающей линии (короткое замыкание на линии, схлест проводов). Целесообразно после выяснения вида повреждения делать запись в журнале простоя электрооборудования о его причине [2, 4, 14].

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14

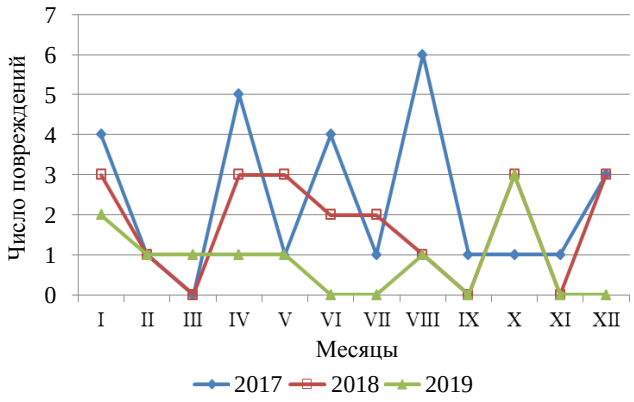


Рис.2. Количество повреждений по фидеру на АБК за отдельные месяцы 2017-2019 гг.

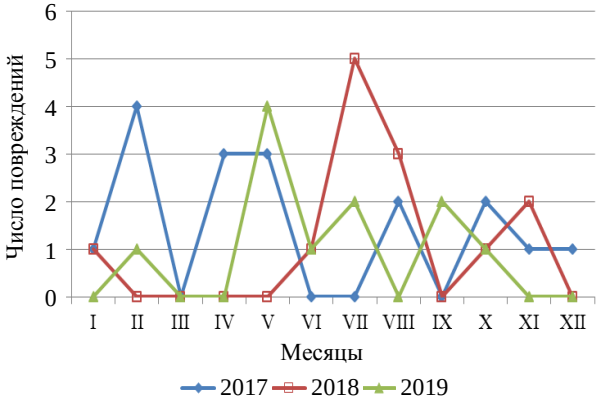


Рис.3. Количество повреждений по фидеру ячейки 3 на хвостовое хозяйство за отдельные месяцы 2017-2019 гг.

Таким образом, основной новизной работы является выявление повреждений, вызванных токами коротких замыканий.

Анализ повреждений в электрической сети ГОК. Для уменьшения абсолютного количества повреждений в электрической сети напряжением 10 кВ следует повысить общий уровень ее эксплуатации. Особой тщательности требует проведение профилактических мероприятий перед весной и в зимний период, когда происходит максимум повреждений. Необходимо уделять внимание проведению профилактических работ в середине и в конце недели, так как основная масса повреждений приходится на этот период. Поскольку по журналу регистрации простоя электрооборудования невозможно оценить повреждения, целесообразно в дальнейшем дежурному персоналу подстанции выяснять причину срабатывания защиты и отмечать ее в журнале регистрации и учета повреждений. Это необходимо для целенаправленной профилактической работы по сокращению отдельных видов повреждений.

Расчет релейной защиты в электрических сетях ГОК. В последние годы все больше возрастает электропотребление в промышленности, что влечет увеличение мощности трансформаторов и протяженности линий электропередачи. Примером является Маднеупольский горно-обогатительный комбинат (МГОК) [7, 17].

Главная понизительная подстанция МГОК питает основные и вспомогательные подразделения. К основным подразделениям относятся рудник открытых горных работ и обогатительная фабрика [3]. Вспомогательными, но очень ответственными электропотребителями являются поселок городского типа, мастерская специальных гаражей, бетоноузел, клуб, профилакторий, а также соседние поселки, которые питаются с помощью линий электропередачи от ГПП МГОК.

Важнейшими показателями нормальной работы указанных электроприемников являются бесперебойное электроснабжение и надежность. Это не всегда соответствует указанному требованию, так как электрическая сеть имеет значительную разветвленность, а релейная защита и автоматика работаю недостаточно четко и надежно [20, 23]. Следствием является неселективное отключение многих электропотребителей, недоотпуск электроэнергии и, тем самым, простои электрооборудования. Это в свою очередь ухудшает технико-экономические показатели работы многих подразделений и наносит вред населению и персоналу, обслуживающему основное и вспомогательное производство. Необходима рационализация, повышение эффективности и надежности работы релейной защиты и автоматики в электрических сетях МГОК [16, 19, 22].

С использованием уточненной схемы электроснабжения произведен расчет токов короткого замыкания, что позволило, имея численные значения токов короткого замыкания, рассчитать уставки релейной защиты и дать рекомендации по месту ее установки и настройки, чтобы обеспечить нормальную работу потребителей электроэнергии [12, 13].

В работе представлена методика расчета токов короткого замыкания в СЭС ГОК и на ее основе проведен анализ релейной защиты отходящих кабельных линий. Аналогичные результаты по расчету параметров релейной защиты получены и для других потребителей электроэнергии на ГОК, но ввиду ограниченности объема работы не представлены.

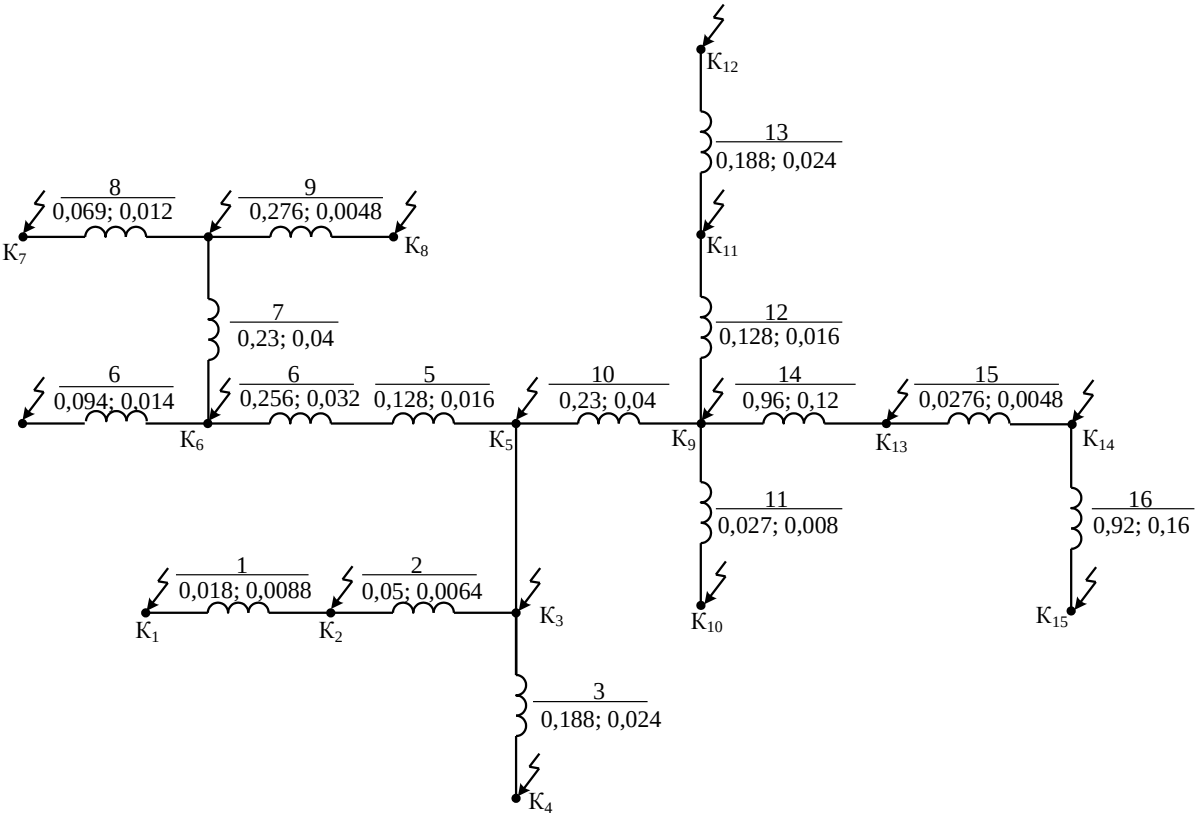


Рис.4. Схема замещения с указанием активного и индуктивного сопротивлений линии, отходящей от ячейки 3, 15 на АБК

Методика расчета токов короткого замыкания в системе электроснабжения МГОК напряжением выше 1000 В. Для расчета токов короткого замыкания составляются расчетные схемы и соответствующие им схемы замещения линий, отходящих от ячеек КРУН-10 кВ ГПП, подстанции 10 кВ «Промплощадка» и ЦРП. Схема замещения для схемы, представленной на рис.1, приведена на рис.4.

В расчете используется метод приближенного приведения, при котором напряжение на всех ступенях трансформации принимается равным среднему $U_{ср}$.

Для расчета тока короткого замыкания за трансформатором нужно знать мощность короткого замыкания. Для определения мощности короткого замыкания за силовым трансформатором ГПП воспользуемся формулой

$$S_к = S_{т.ном} \cdot \frac{100}{u_к}, \quad (1)$$

где $S_{т.ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; $u_к$ – напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения $U_{ном}$.

На ГПП установлен силовой трехобмоточный трансформатор типа ТДТН-25/110 с $u_к$ = 10,5 кВ для обмотки напряжением 10,5 кВ,

$$S_к = 25000 \cdot \frac{100}{10{,}5} = 238095 \text{ кВА}.$$

Ток короткого замыкания на стороне 10,5 кВ трансформатора в точке $К_1$:

$$I_{к1} = \frac{S_к}{\sqrt{3} \cdot U_{ср2}}, \quad (2)$$

где $U_{ср2}$ – принятая величина среднего напряжения за трансформатором на стороне напряжением 10 кВ,

$$I_{к1} = \frac{238095}{\sqrt{3} \cdot 11} = 12500 \text{ А}.$$

По заданной и уточненной схеме электроснабжения МГОК составляется расчетная схема замещения с учетом того, что при расчете токов короткого замыкания необходим учет активного сопротивления при условии, что отношение $r/x > 1/3$.

Сопротивление системы определяется, исходя из рассчитанного значения тока короткого замыкания за трансформатором на стороне напряжением 10,5 кВ: $z_c = x_c = 0{,}508$ Ом.

Активные и индуктивные сопротивления (r и x) кабельных и воздушных линий определяются из следующих соображений:

• индуктивное сопротивление кабеля находится из расчета, что x_0=0,08 Ом/км – удельное сопротивление 1 км линии, зависящее от типа линии, материала проводов, способа выполнения ЛЭП напряжением 10,5 кВ;

• активное сопротивление линии определяется по известному выражению, включающему в себя удельную проводимость кабельных линий и сечение рассматриваемой линии;

• индуктивное сопротивление воздушных линий рассчитывается для кабельных линий, данные по удельному сопротивлению на 1 км линии берутся из справочных данных.

Расчет трех- и двухфазных токов короткого замыкания производится по формулам:

$$I_{к}^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot z_{рез}}; \tag{3}$$

$$I_{к}^{(2)} = I_{к}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \tag{4}$$

где $z_{рез}$ – результирующее значение сопротивления цепи короткого замыкания (от источника питания до точки короткого замыкания), $z_{рез} = \sqrt{(x_{рез})^2 + (r_{рез})^2}$; сумма индуктивных сопротивлений участков линии до точки короткого замыкания $x_{рез} = \sum_{1}^{n} x = x_1 + x_2 + ... + x_n$; сумма активных сопротивлений участков линии до точки короткого замыкания $r_{рез} = \sum_{1}^{n} r = r_1 + r_2 + ... + r_n$.

Поскольку по условию $r/x > 1/3$, то активное сопротивление $r_{рез}$ должно учитываться при расчетах токов короткого замыкания.

По приведенным формулам рассчитываются величины токов трех- и двухфазных коротких замыканий. Схема замещения, на которой указаны величины сопротивлений элементов сети, расчет которых необходимо произвести, показана на рис.4. Результаты вычислений токов трех- и двухфазных коротких замыканий сведены в табл.1.

Таблица 1

Данные для расчета токов короткого замыкания и величины токов трех- и двухфазных коротких замыканий линии, отходящей от ячейки 3 и 15 на АБК

Точка к.з.	$r_{рез}$, Ом	$x_{рез}$, Ом	$z_{рез}$, Ом	$I_к^{(3)}$, А	$I_к^{(2)}$, А
$К_1$	–	0,508	0,508	12501	10826
$К_2$	0,018	0,5168	0,5171	12281	10635
$К_3$	0,068	0,5232	0,5276	12037	10424
$К_4$	0,256	0,5472	0,6041	10512	9103
$К_5$	0,35	0,5612	0,6614	9602	8315
$К_6$	0,734	0,6092	0,9538	6658	5765
$К_7$	1,033	0,6612	1,2264	5178	4484
$К_8$	0,9916	0,654	1,1878	5346	4630
$К_9$	0,67	0,6012	0,9001	7055	6110
$К_{10}$	0,697	0,6092	0,9257	6860	5941
$К_{11}$	0,798	0,6172	1,0088	6295	5452
$К_{12}$	0,986	0,6412	1,1761	5399	4676
$К_{13}$	1,63	0,7212	1,7824	3563	3085
$К_{14}$	1,6576	0,726	1,8096	3509	3039

K_{15}	2,5776	0,886	2,7256	2330

Составляется карта селективности работы максимальных токовых защит в электрической сети напряжением 10 кВ МГОК. В соответствии с ПУЭ на одиночных линиях с односторонним питанием от многофазных замыканий должна устанавливаться двухступенчатая токовая защита, первая ступень которой выполнена в виде токовой отсечки, а вторая – максимальной токовой защиты с независимой или зависимой характеристикой выдержки времени.

Поскольку смешанная кабельно-воздушная сеть напряжением 10 кВ МГОК представляет собой разомкнутую радиальную сеть с односторонним питанием, то для нее предусматривается установка и расчет МТЗ и ТО. Карта селективности релейной защиты составляется в следующей последовательности:

• составляется схема замещения электрической сети каждой из рассмотренных выше линий;

• определяются сопротивления отдельных элементов схемы в соответствии с маркой, сечением и длиной линий;

• рассчитываются токи трех- и двухфазных коротких замыканий в отдельных точках сети;

• определяются токи срабатывания защит в местах присоединения понизительных подстанций и на каждой отходящей линии в местах установки защит;

• определяется коэффициент чувствительности $k_ч$;

• устанавливаются выдержки времени МТЗ.

Используя данные по расчету трех- и двухфазных токов короткого замыкания для отдельных отходящих радиальных линий, производится расчет тока срабатывания и проверка выбранных защит по чувствительности. Ток срабатывания максимальной токовой защиты определяется по формуле

$$I_{с.з} = \frac{k_н k_п}{k_в} I_{раб.max}, \quad (5)$$

где $k_н$ = 1,1-1,2 – коэффициент надежности; $k_п$ – коэффициент самозапуска; $I_{раб.\,max}$ – максимальный рабочий ток (номинальный ток потребителей), А; $k_в$ – коэффициент возврата, $k_в$ = 0,6-0,7 – для реле типа РТМ, $k_в$ = 0,8-0,85 – для реле типа РС40.

Ток срабатывания реле

$$I_{с.р} = \frac{k_{сх} I_{с.з}}{n_{тт}}, \quad (6)$$

где $k_{сх}$ – коэффициент схемы, равный 1 при включении двух реле на фазные токи по схеме неполной звезды и равный $\sqrt{3}$ при включении одного реле на разность токов двух фаз; $n_{тт}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Коэффициент чувствительности

$$k_ч = \frac{I_{кз.\,min}}{I_{с.р} n_{тт}} = \frac{I^{(2)}_{к.з}}{I_{с.з}}, \quad (7)$$

где $I^{(2)}_{к.з} = I_{к.з.min}$ – ток двухфазного короткого замыкания в конце защищаемой зоны.

В соответствии с ПУЭ $k_ч \geq 1,5$ – при коротком замыкании в конце защищаемого участка, $k_ч \geq 1,2$ – при коротком замыкании в конце смежного участка, при работе МТЗ как резервной защиты и для токовых отсечек, выполненных как резервные.

Расчет тока срабатывания токовой отсечки будет производиться по формуле

$$I_{с.з} = k_н I^{(3)}_{к.з.вн.max}, \quad (8)$$

где $k_н$ = 1,2-1,4; $I^{(3)}_{к.з.вн.max}$ – ток трехфазного короткого замыкания в начале смежного участка.

Произведем расчет релейной защиты отходящих линий. Линия – выход на АБК с ячеек 3 и 15 (см. рис.1).

• На рассматриваемой линии устанавливается МТЗ на $МВ_1$ (рядом с подстанцией «2-й подъем»). Считаем максимальную нагрузку $I_{р.max}$ по номинальной мощности присоединенных трансформаторов к отходящей линии за $МВ_1$ (см. рис.1). Определяем ток срабатывания для $МВ_1$ по выражению (5):

$$I_{с.з} = \frac{1{,}2 \cdot 2{,}5}{0{,}85} \cdot 46{,}7 = 164{,}8 \text{ А},$$

где

$$I_{раб.max} = \frac{\sum_{1}^{n} S_{ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{н}} = \frac{850}{\sqrt{3} \cdot 10{,}5} = 46{,}7 \text{ А}.$$

Ток срабатывания реле по выражению (6):

$$I_{с.р.} = \frac{1 \cdot 164{,}8}{10} = 16{,}4 \text{ А}.$$

К установке выбираем электромагнитное микропроцессорное реле типа РС40/20 с током срабатывания 17 А.

Проверяем чувствительность защиты по выражению (7):

$$k_{ч} = \frac{2017}{17 \cdot 10} = 11{,}8.$$

Получим $k_ч > 1{,}5$, т.е. защита является достаточно чувствительной к току короткого замыкания в начале зоны действия (в точке $К_{15}$).

Эксплуатация сетей напряжением 10 кВ отходящих линий от РП-10 показала, что на участке отходящей линии на АБК при протекании токов короткого замыкания порядка 10-12 кА очень часто выходит из строя кабельная вставка в начале указанной линии. Это приводит к обесточиванию большого числа потребителей, включая и поселок Казрети, который питается от этой линии [1, 5, 11]. Причиной является большая величина протекающего тока короткого замыкания и значительное время релейной защиты, действующей на отключение тока [6, 10, 15]. Для уменьшения повреждаемости кабельной вставки и увеличения надежности питания потребителей было бы целесообразно осуществить разделение указанной линии на две параллельные. Для этого потребуется задействовать раздельно ячейки 3 и 15 подстанции напряжением 10 кВ «Промплощадка», установить 11 опор и проложить 450 м проводов сечением А-50.

Ограничение тока короткого замыкания можно осуществить установкой реактора типа РБ-10-630-0,25. Это повысит надежность работы масляных выключателей при отключении, расчетные значения сопротивления цепи короткого замыкания и токов после установки реактора типа РБ-10-630-0,25 приведены в табл.2.

Таблица 2

Активные и индуктивные сопротивления для расчета токов короткого замыкания и величины токов трех- и двухфазных коротких замыканий линии, отходящей от ячейки 3 и 15 на АБК с учетом сопротивления линейного реактора

Точка к.з.	$r_{рез}$, Ом	$x_{рез}$, Ом	$z_{рез}$, Ом	$I_к^{(3)}$, А	$I_к^{(2)}$, А
$К_1$	–	0,758	0,758	8378	7255
$К_2$	0,0180	0,7704	0,7706	8241	7137
$К_3$	0,068	0,7768	0,7797	8145	7053
$К_4$	0,256	0,8008	0,844	7524	6516
$К_5$	0,35	0,8148	0,8867	7162	6202
$К_6$	0,734	0,8628	1,1327	5606	4856
$К_7$	1,033	0,9148	1,3798	4602	3986
$К_8$	0,9916	0,9076	1,3442	4724	4091
$К_9$	0,67	0,8548	1,086	5847	5064
$К_{10}$	0,697	0,8628	1,1091	5726	4959
$К_{11}$	0,798	0,8708	1,1811	5377	4657
$К_{12}$	0,986	0,8948	1,3314	4770	4130

$К_{13}$	1,6576	0,9448	1,8992	3343	2896
$К_{14}$	1,6576	0,94	1,9055	3333	2886
$К_{15}$	2,5776	1,1	2,8025	2266	1963

Из табл.2 следует, что установка реактора позволит существенно снизить токи короткого замыкания и повысить надежность системы электроснабжения МГОК. Поэтому представляется целесообразным дать заявку на подготовку этого реактора. Однако, за неимением возможности установки реактора в настоящее время, предлагается повысить быстродействие существующей МТЗ, имеющей выдержку времени. С этой целью рекомендуется на фидере, отходящем на АБК, установить токовую отсечку.

Определим коэффициент чувствительности для МТЗ на масляном выключателе $МВ_1$ после возможной установки реактора (с учетом рассчитанных токов короткого замыкания в табл.3) по выражению (7):

$$k_{ч} = \frac{1963}{10 \cdot 17} = 11{,}5.$$

Очевидно, что после установки реактора чувствительность защиты остается очень высокой и, следовательно, будет работать достаточно хорошо.

• Расчитаем МТЗ на масляном выключателе $МВ_{ЦРП}$ в начале отходящей линии на АБК (ячейка 3 или 15). Аналогично предыдущему расчету считаем, что максимальный рабочий ток будет соответствовать току $I_н = I_{р.max} = 300$ А.

Определяем ток срабатывания МТЗ по выражению (5):

$$I_{с.з} = \frac{1{,}2 \cdot 2{,}5}{0{,}85} \cdot 300 = 1058 \text{ А}.$$

Ток срабатывания реле будет равен по формуле (6):

$$I_{с.р} = \frac{1 \cdot 1058}{60} = 17{,}6 \text{ А}.$$

К установке принимается реле типа РС40/20 на величину тока 20 А с $I_{с.р} = 18$ А.

Определяем коэффициент чувствительности до установки реактора по выражению (7):

$$k_{ч} = \frac{3085}{18 \cdot 60} = 2{,}86.$$

После установки реактора

$$k_{ч} = \frac{2896}{18 \cdot 60} = 2{,}68.$$

Таким образом, максимальная токовая защита будет чувствительна и до и после установки реактора.

• Рассчитаем ток срабатывания токовой отсечки на линии, отходящей на АБК от ячейки 3 или 15 для $МВ_{ЦРП}$. Расчет ведется по формуле (8).

До установки реактора:

$$I_{с.з.то} = k_н I^{(3)}_{к.з.(кл3).max} = 1{,}3 \cdot 3563 = 4631{,}9 \text{ А};$$

$$I_{с.р.то} = \frac{I_{с.з.то}}{n_{тт}} = \frac{4631{,}9}{60} = 77{,}2 \text{ А}.$$

Принимается к установке реле типа РС40/100 с $I_{с.р} = 80$ А. Определяется коэффициент чувствительности по выражению (7):

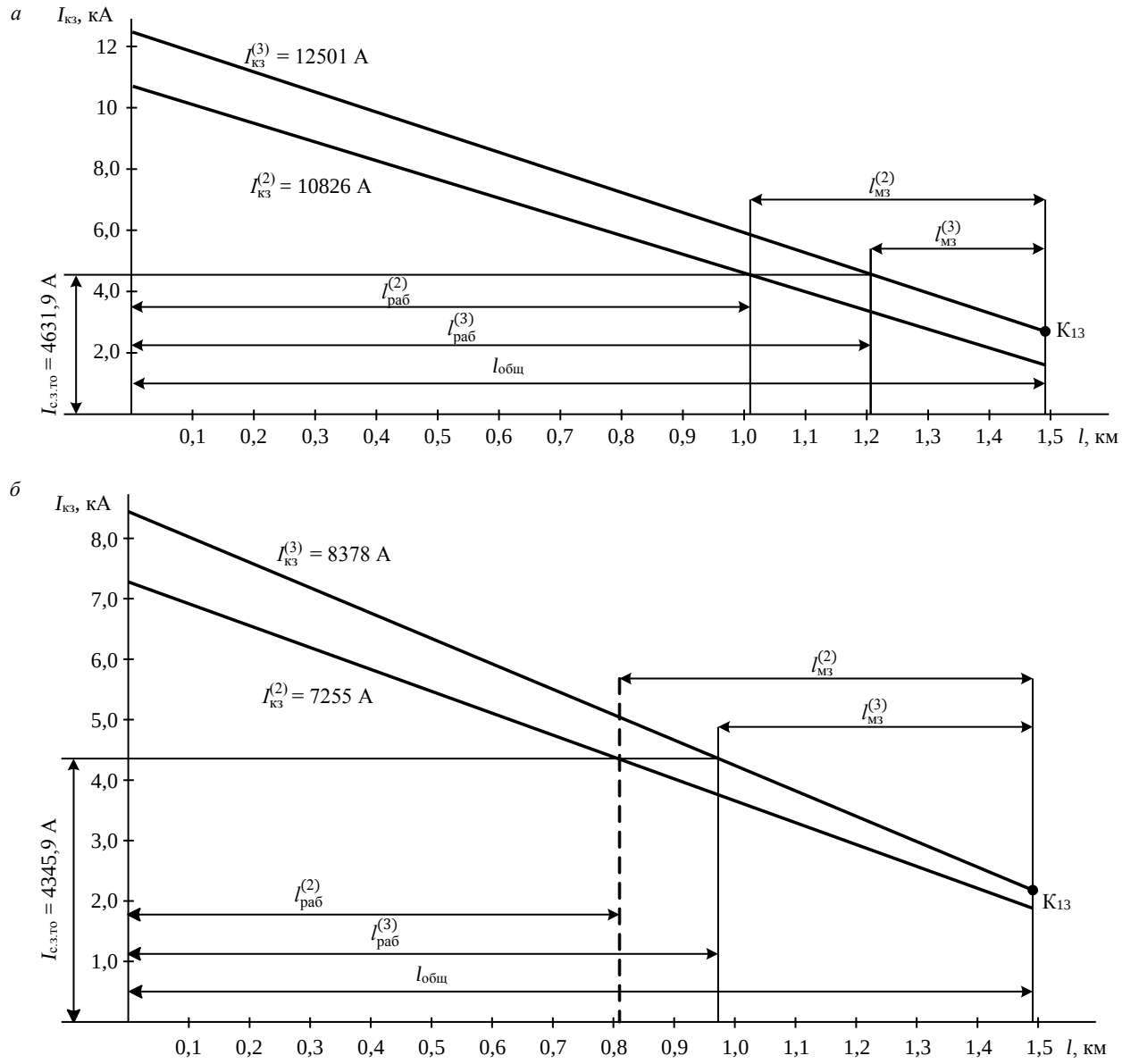


Рис.5. Графическое определение рабочей зоны токовой отсечки: *а* – $l_{раб}^{(2)}$ – рабочая зона при двухфазном коротком замыкании (73,8 %·$l_{общ}$); $l_{раб}^{(3)}$ – рабочая зона при трехфазном коротком замыкании (81,2 %·$l_{общ}$); *б* – $l_{раб}^{(2)}$ – 54,4 %·$l_{общ}$; $l_{раб}^{(3)}$ – 65,8 %·$l_{общ}$; $l_{мз}$ – мертвая зона токовой отсечки

$$k_{ч} = \frac{I_{к.з(к1)}^{(2)}}{I_{с.р} n_{тт}} = \frac{10826}{80 \cdot 60} = 2{,}26.$$

Токовая отсечка является чувствительной, так как $k_{ч} > 2$.

После установки реактора:

$$I_{с.з.то} = k_{н} I_{к.з.(к13).max}^{(3)} = 1{,}3 \cdot 3343 = 4345{,}9 \text{ А};$$

$$I_{с.р.то} = \frac{I_{с.з.то}}{n_{тт}} = \frac{4345{,}9}{60} = 72{,}43 \text{ А}.$$

Принимается к установке реле типа РС40/100 с $I_{с.р}$ = 75 А. Определяется коэффициент чувствительности по выражению (7):

$$k_{\text{ч}} = \frac{I^{(2)}_{\text{к.з(к1)}}}{I_{\text{с.р}} n_{\text{тт}}} = \frac{7255}{75 \cdot 60} = 1{,}7 .$$

Эффективность токовой отсечки после установки реактора снизилась до величины $k_{\text{ч}}$=1,7. Однако, в соответствии с ПУЭ для токовых отсечек без выдержки времени, устанавливаемых на линиях и выполняющих функции дополнительных защит, коэффициент чувствительности должен быть около 1,2 при коротком замыкании в месте установки защиты в наиболее благоприятном по условию чувствительности режиме.

Эффективность токовой отсечки для рассматриваемой линии определяется графически для двух режимов: до установки реактора (рис.5, *а*); после установки реактора (рис.5, *б*).

Из рис.5 видно, что минимальное значение рабочей зоны токовой отсечки составляет 54 % от длины всей линии, т.е. отсечка является эффективной и в одном и в другом случае (с реактором и без него).

Время срабатывания защит на рассматриваемой линии указано на рис.1 и в табл.3 построения карты селективности, где уставки защит указаны по первичному и вторичному току $I_{\text{с.з}}$ и $I_{\text{с.р}}$.

Таблица 3

Карта селективности релейной защиты при питании электропотребителей от радиальных линий напряжением 10 кВ

Отходящая линия	Место установки защиты	Тип защиты	Тип токового реле	$k_{\text{сх}}$	$I_{\text{с.з}}$, А	$n_{\text{тт}}$	$I_{\text{с.р}}$, А	$k_{\text{ч}}$	t, с	Примечание
От ячеек 3, 15 на АБК	$МВ_1$	МТЗ	РТ-40/20	1	170	50/5	17	11,8	0	
	$МВ_{ЦРП}$	МТЗ	РТ-40/20	1	1080	300/5	18	2,8	0,6	
		ТО	РТ-40/100	1	4800	300/5	80	2,26	0	До установки реактора
					4500		75	1,7		После установки реактора
От ячейки 14 вывод № 2 к ЦММ	$МВ_2$	МТЗ	РТ-40/50	1	520	100/5	26	6,5	0	$I_{\text{р.max}}$ = 146,2 А
	$МВ_{ЦММ}$	МТЗ	РТ-40/50	1	760	100/5	38	13,7	0,6	$I_{\text{р.max}}$ = 215,5 А
От ячейки 4 вывод № 1 к ЖЗБ	$МВ_2$	МТЗ	РТ-40/50	1	520	100/5	26	6,5	0	$I_{\text{р.max}}$ = 146,2 А
	$МВ_{ЖЗБ}$	МТЗ	РТ-40/20	1	900	300/5	15	5,6	0,6	
		ТО	РТ-40/100	1	6000	300/5	100	1,78	0	
От ячейки 15 ввод на ТП-9	$МВ_2$	МТЗ	РТМ	1	480	150/5	16	3,6	0	
	$МВ_1$	МТЗ	РТВ	1	750	150/5	25	2,9	0,6	
	$МВ_{ЦРП}$	МТЗ	РТ-40/20	1	1020	300/5	17	7,8	1,1	
Вывод с ячейки 3 КРУН 10 кВ	$МВ_{КРУН}$	МТЗ	РТ-40/50	1	720	150/5	24	3,5	0	$I_{\text{р.max}}$ = 218,8 А

По всем остальным подстанциям ГОК по приведенной методике выполнены аналогичные расчеты.

Выводы

1. Для уменьшения количества повреждений кабельной вставки на линии, отходящей на АБК, и увеличения надежности питания потребителей целесообразно осуществить разделение мощностей существующей линии напряжением 10 кВ на две параллельные путем прокладки второй линии. Для этого потребуется задействовать раздельно ячейки 3 и 15, установить 11 опор и проложить 450 м проводов сечением А-50.

2. Ограничение тока короткого замыкания можно осуществить установкой рекатора типа РБ-10-630-0,25. Это повысит надежность работы масляных выключателей при отключении токов короткого замыкания (расчетные значения сопротивлений цепи и токов короткого замыкания до и после установки реактора типа РБ-10-630-0,25 приведены в табл.1 и 2).

3. На линии, отходящей на АБК, рекомендуется установить токовую отсечку, целесообразность установки которой показали расчеты. Это уменьшит вероятность повреждаемости кабельной вставки. Данные по токам уставки МТЗ и ТО приведены на карте селективности (табл. 3).

4. Рекомендуется установить минимальное время работы релейной защиты на отходящих линиях.

5. На отходящей линии от ячейки 14 вывод № 2 к ЦММ в месте установки $МВ_2$ установить трансформаторы тока 150/5 на $I_н = 150$ А вместо существующих 100/5, так как $I_{р.max} = 146{,}2$ А. В месте установки $МВ_{ЦММ}$ необходимо заменить существующие трансформаторы тока с $n_{тт} = 100/5$ на ТТ с $n_{тт} = 250/5$, так как $I_{р.max} = 215{,}5$ А.

6. На отходящей линии «вывод с 3-й ячейки КРУН-10 кВ» необходимо вместо существующих трансформаторов тока с $n_{тт} = 150/5$ установить трансформатор тока с $n_{тт} = 250/5$, так как $I_{р.max} = 218{,}8$ А.

7. Решение проблемы построения эффективной релейной защиты на ГОК в данной работе заключается в разработке методики расчета токов короткого замыкания в СЭС для условий предприятий в горной местности с расчетом для конкретного ГОКа. Разработанная методика и полученные результаты могут быть использованы на аналогичных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Б.Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31

2. Анализ состояния изоляции электрооборудования горно-металлургических комбинатов / Р.В.Клюев, И.И.Босиков, О.А.Гаврина, К.С.Кирсанов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. Т. 2. С. 201-215.

3. *Голик В.И.* Основа устойчивого развития РСО-Алания – горнодобывающая отрасль / В.И.Голик, Ю.И.Разоренов, К.Г.Каргинов // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 2(32). С. 163-172. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9- 2-163-171

4. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р.В.Клюев, И.И.Босиков, А.В.Майер, О.А.Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 2(44). С. 283-290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290

5. Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов / Б.Ю.Васильев, В.А.Шпенст, О.В.Калашников, Г.Н.Ульянов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 41-49. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

6. *Пирог С.* Идентификация местоположения нелинейной электрической нагрузки / С.Пирог, Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамьин // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 317-321. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.317

7. Система оценки устойчивого развития региональных народнохозяйственных комплексов горных территорий / С.В.Галачиева, А.А.Соколов, О.А.Соколова, С.А.Махошева // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 3(37). С. 329-335. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10- 3-329-335

8. A novel single-phase-to-earth fault location method for distribution network based on zero-sequence components distribution characteristics / L.Rui, P.Nan, Y.Zhi, F.Zare // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 102. P. 11-22. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.015

9. *Ahmed E.S.* Parameter less earth fault locator algorithm based on transient surges resulting from single-pole breaker opening // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 2609-2616. DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.002

10. An assessment of the impact of longwall panel width on the height of complete groundwater drainage in underground thick coal seam mining / O.Kazanin, A.Sidorenko, N.Koteleva, D.Belova // Test Engineering and Management. 2020. Vol. 83. P. 5568-5572.

11. Distortion load identification based on the application of compensating devices / Y.Shklyarskiy, A.Skamyin, I.Vladimirov, F.Gazizov // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 6. № 1430. DOI: 10.3390/en13061430

12. Dynamic phasor-driven digital distance relays protection / E.Vázquez, A.Zamora-Mendez, M.Arrieta Paternina et al. // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 184. № 106316. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106316

13. *Eissa M.* Developing Busbar protection with new differential characteristics to solve the breakpoint settings of digital commercial relays // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 98. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.11.006

14. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises / R.Klyuev, I.Bosikov, O.Gavrina, M.Madaeva, A.Sokolov // Advances in Intelligent Systems and Computing: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT'19), 10-13 December 2019, Voronezh, Russia. Springer, 2021. Vol. 1258. P. 262-271. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_24

15. *Litvinenko V.S.* Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

16. *Momesso A.* Fuzzy adaptive setting for time-current-voltage based overcurrent relays in distribution systems / A.Momesso, W.Bernardes, E.Asada // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 108. P. 135-144. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.12.035

17. *Petrov Yu.S.* Increase of effective management of technological processes of the mountain enterprise on the basis of the analysis of information on technogenic cycles / Yu.S.Petrov, A.A.Sokolov // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 19-20 May 2016, Chelyabinsk, Russia. IEEE, 2016. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911691

18. Segment location for single-phase-to-ground fault in neutral non-effectively grounded system based on distributed electric-field measurement / D.Xiao, T.He, R.Xiao, X.Du // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 184. Iss. 4. P. 106321. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106321

19. *Sudhakar P.* Reducing the impact of DG on distribution networks protection with reverse power relay / P.Sudhakar, S.Malaji, B.Sarvesh // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Iss. 1. Part 1. P. 51-57. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.052

20. The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics / Yu.L.Zhukovskiy, N.A.Korolev, I.S.Babanova, A.V.Boikov // Innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering, 23-24 March 2017, Saint-Petersburg, Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. Vol. 87. Iss. 3. № 032055. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032055

21. Transferred Voltages due to Single Phase Earth Fault on Power Transformers / K.C.Bikić, M.Gazdović, F.Kelemen, A.Lojpur // Procedia Engineering. 2017. Vol. 202. P. 305-311. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.718

22. *Ukil A.* Power systems frequency estimation using amplitude tracking square wave for low-end protective relays / A.Ukil, Y.Yeap, K.Satpathi // Measurement. 2019. Vol. 141. P. 70-84. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.03.068

23. *Zhukovskiy Y.* Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters / Y.Zhukovskiy, N.Koteleva // Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2018), 27-28 February 2018, Omsk, Russia. IOP, 2018. Vol. 1050. № 012106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106

***Авторы*: Р.В.Клюев,** *д-р техн. наук, профессор, kluev-roman@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3777-7203* (*Московский политехнический университет, Москва, Россия*), **И.И.Босиков,** *канд. техн. наук, доцент, igor.boss.777@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8930-4112* (*Северо-Кавказский горно-металлургический институт* (*государственный технологический университет*), *Владикавказ, Россия*), **О.А.Гаврина,** *канд. техн. наук, доцент, Gavrina-Oksana@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9712-9075* (*Северо-Кавказский горно-металлургический институт* (*государственный технологический университет*), *Владикавказ, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 5.10.2020.
Статья принята к публикации 23.03.2021.