

# ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.316.933.002.25.

*О.Н. Синчук, д-р техн. наук, А.Г. Ликаренко, канд. техн. наук, А.А. Петриченко*  
(Украина, г. Кривой Рог, Государственное высшее учебное заведения "Криворожский национальный университет")

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ РУДНИЧНЫХ НА ПОСТОЯННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СЕТЕЙ

### Постановка проблемы та ее связь с прикладными задачами

В соответствии с нормативами безопасности труда в рудничных электрических сетях до 1000 В применяются устройства защиты от токов утечки, которые должны иметь такие функциональные характеристики, чтобы ток через тело человека (напряжение прикосновения) и время действия в интервале до 1с не превышали значений, установленных ГОСТ ССБТ.12.1.038–82 [1–3]. Применением устройств защитного отключения при соответствующем выборе их параметров можно достичь различных уровней электробезопасности [4]. Уровень электробезопасности определяется величиной наибольшего тока, который может протекать через тело человека, прикоснувшегося к токоведущим частям. Меньшему значению тока соответствует более высокий уровень электробезопасности.

Если изоляция и ее емкость симметричны относительно земли, то ток, протекающий через тело человека,

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\phi} \cdot g'_y \cdot \sqrt{G^2 + b^2}}{\sqrt{(G + g'_y)^2 + b^2}}, \quad (1)$$

где  $G$  – активная проводимость изоляции сети относительно земли;  $b = \omega \cdot C_u$  – реактивная (емкостная) проводимость сети относительно земли;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;  $g'_y$  – проводимость однофазной утечки.

При этом максимальная безопасность будет достигнута в том случае, когда защита предотвращает возможность протекания даже кратковременного тока утечки  $I_{\text{ч}}$ , превышающего его длительное, допустимое для человека значение  $I_{\text{дл.д}}$ , т.е. когда соблюдается условие

$$I_{\text{ч}} \leq I_{\text{дл.д}}. \quad (2)$$

С уравнения (2) не трудно увидеть, что при любой проводимости утечки  $g'_y$  это условие выполняется, если

$$\sqrt{G^2 + b^2} \leq \frac{I_{\text{дл.д}}}{U_{\phi}}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что для достижения максимального уровня электробезопасности необходимо прекращать эксплуатацию сети при увеличении полной её проводимости относительно земли до значения

$$\sqrt{G^2 + b^2} = \frac{I_{\text{дл.д}}}{U_{\phi}}. \quad (4)$$

Однако на практике характеристики параметров изоляции (функция распределения и плотность вероятности) при двухсторонней доверительной вероятности  $\nu = 0,95$  таковы, что защита от утечек, реали-

зующая максимальную безопасность по условию (4), сработает при первом же включении сети. Так, в рудных шахтах параметры изоляции электрических сетей напряжением до 1000 В находятся в пределах:

- сопротивление изоляции всей сети и присоединений подстанций и ее шин <32 кОМ;
- общая емкость изоляции всей сети <2,5 мкФ, а присоединений подстанции <1,0 мкФ.

Значительная емкость реальных сетей относительно земли и отсутствие высокоэффективных средств автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки не позволили реализовать защиту от утечек, обеспечивающую максимальную безопасность. Однако *минимальная безопасность* на практике достигается при соблюдении двух таких условий:

$$g'_y \leq g'_{y.np}; \quad (5)$$

$$\sqrt{G^2 + b^2} = \frac{I_{к.д} \text{ или } Q_{дон}}{U_{\phi} \cdot t_r \cdot U_{\phi}} \quad (6)$$

где  $g'_{y.np}$  – предельное значение сопротивления утечки, при котором выполняется условие (2);  $I_{к.д}$  – кратковременный, предельно допустимый ток утечки, протекающий через минимальное расчетное сопротивление тела человека при сопротивлении изоляции не менее сопротивления срабатывания и емкости изоляции сети в пределах рабочего диапазона в течение времени отключения сети и действия работы электродвигателей [3];

$$Q_{дон} = \int_0^{t_q} i_q(t) dt \leq 50 \text{ мА} \cdot \text{с} \text{ – допустимое количество электричества, про-}$$

ходящего через тело человека за время протекания тока  $t_q$  под действием рабочего напряжения сети и ЭДС вращающихся электродвигателей до отключения контакторов аппаратов управления [3];

где  $t_q$  – время протекания тока через тело прикоснувшегося человека.

Для реализации условий (5) и (6) необходимо, чтобы защита вызывала отключение сети от источника питания как при появлении предельной утечки  $r'_{y.np} = 1/g'_{y.np}$ , так и при снижении активного сопротивления изоляции до критического отключающего значения  $R_{u(кр)} = 1/G$ .

Величина отключающего сопротивления  $R_{u(кр)}$  определяется с учетом предельного значения емкости сети, как и для случая реализации защиты, обеспечивающей *максимальную безопасность*, с той лишь разницей, что в качестве длительного допустимого тока  $I_{дл.д}$  принимается кратковременный предельно допустимый ток  $I_{к.д}$ .

Проверка условия достижения *минимальной безопасности* (5) осуществляется сравнением фактических защитных характеристик аппарата защиты от утечек с требуемыми по условию обеспечения электробезопасности [4]. Причем фактические защитные характеристики должны находиться выше требуемых (в зоне значений, не превышающих 150 % уставки).

Применяемые в отечественной и зарубежной практике подземных предприятий схемы аппаратов защиты от токов утечки основаны на принципе измерения активного сопротивления фаз сети относительно земли. Они, как правило, предназначены для простых сетей промышленной частоты, где основными дестабилизирующими факторами являются параметры изоляции сети. Однако в этих сетях в последнее время начали применяться полупроводниковые преобразователи энергии для регулируемых электроприводов, что превратило их в комбинированные сети, состоящие из участков промышленной частоты (50 Гц), участков постоянного тока и участков изменяемой частоты 0 – 70 Гц. Так как существующие аппараты защиты выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 22929–73 [3], который не распространяется на аппараты защиты для комбинированных сетей, то и применение существующих аппаратов защиты в таких сетях неправомерно.

Это было известно еще в 80–х годах прошлого века, когда предпринимались попытки внедрения в угольные шахты комбайнов с регулируемой подачей режущего органа на постоянном токе [5]. Однако аппарат защиты от тока утечек для комбинированных сетей до сих пор не создан. Поскольку, фактические защитные характеристики существующих аппаратов защиты, исходя из дестабилизирующих факторов комбинированных сетей, еще не установлены, то и дать оценку степени выполнения условий *минимальной безопасности* (5) и (6) пока невозможно.

#### **Состояние вопроса**

В комбинированной сети основными дестабилизирующими факторами являются:

- а) колебания параметров изоляции электрической сети;
- б) гармонические составляющие напряжения сети, образующиеся при коммутации тиристором;
- в) субгармонические составляющие, которые возникают за счет асимметрии в каналах управления и динамики процессов управления преобразователя;
- г) асимметрия выходного напряжения преобразователя, увеличивающая токи утечки на 20–30% из-за асимметрии выходного напряжения преобразователя при асимметрии угла управления  $\Delta\alpha = 5 - 10^\circ$  [4].

Таким образом, в комбинированной сети токи утечки носят случайный характер и для их измерения и оценки необходимо руководствоваться методами теории вероятности и математической статистики.

Одним из направлений в создании аппаратуры защиты от токов утечек для сетей с преобразователями энергии является разработка аппаратов постоянного оперативного тока на базе существующих трехфазных электрических сетей переменного тока [6]. Однако давно известно, что любой аппарат, работающий на постоянном оперативном токе, не может обеспечить безопасность эксплуатации сетей с выпрямителями из-за функциональных отказов при возникновении токов утечек или плавном снижении сопротивления изоляции на участке постоянного тока, так как появляется дополнительный источник постоянного тока между сетью и землей, напряжение которого значительно выше напряжения оперативного тока аппарата защиты [7]. Более тяжелые последствия возникают в распределительных сетях напряжением 1140 В, где для ограничения тока утечки используют устройства обнаружения поврежденной фазы и шунтирование ее через малое сопротивление. Однако это приводит к тому, что протекающий ток будет подпитывать ток утечки на участках постоянного тока и изменяющейся частоты, т.е. ухудшит условия электробезопасности [7].

Для сохранения принципов действия аппаратов защиты АЗУР-4, применяющихся в простых трехфазных сетях и заключающихся в наложении на сеть постоянного оперативного тока, контроле его величины при одновременной компенсации емкостной составляющей тока утечки, а также защитном шунтировании поврежденной фазы, институтами ВНИИВЭ и Донгипроуглемаш предложено следующее направление обеспечения электробезопасности комбинированных сетей [7]. Повышается быстродействие аппарата АЗУР-4 с учетом того, что он будет одновременно воздействовать на автоматический выключатель передвижной подстанции, на преобразователь частоты, а также отключать от него кабельную линию при вынесенной системе подачи комбайна. Действительно, предложенная структура взаимодействия аппарата защиты с остальными составляющими распределительной сети, содержащей силовые полупроводниковые приборы, устраняет неправильное функционирование защитного шунтирования поврежденной фазы на участке сети частотой 50 Гц, а за счет отключения преобразователя и включения короткозамыкателя на все его фазы обеспечивает электробезопасность на участках сети постоянного тока и регулируемой частоты. Однако функциональные отказы аппарата АЗУР-4 при утечках на участке постоянного тока не устраняются введенным дополнительно, блоком контроля сопротивления изоляции звена постоянного тока. В публикациях нет никакой информации о принципе контроля ним сопротивления изоляции звена постоянного тока, а также отсутствуют данные о защитных характеристиках двух параллельно работающих аппаратах защиты. На схеме предложенной системы комплексной защиты для блока контроля сопротивления изоляции звена постоянного тока не показана его связь с землей и соответствующими коммутационными аппаратами. Окончательные выводы об обеспечении минимальной безопасности предложенной системой комплексной защиты можно будет сделать только на основании проверки выполнения условий (5) и (6), т.е. если будут сняты защитные характеристики этой защиты и выполнено их сравнение с требуемыми условиями [4].

Так как аппараты защиты, работающие на постоянном оперативном токе, не могут обеспечить безопасность эксплуатации комбинированных сетей, то ряд организаций для сетей с выпрямителями разрабатывает аппаратуры защиты от утечек, работающие на переменном оперативном токе. Одной из основных задач, возникающих при разработке этой аппаратуры, является устранение влияния емкости изоляции на ее защитные характеристики. Ввиду того, что рудничные комбинированные сети имеют значительную емкость изоляции относительно земли (до 1 мкФ на фазу (полус)), то устройства защиты от утечек на переменном оперативном токе будут отключать сеть даже при бесконечно большом сопротивлении изоляции. Это обусловлено тем, что емкостное сопротивление оперативному току оказывается значительно ниже уставки срабатывания аппарата защиты.

Для подземных низковольтных комбинированных электрических сетей ВНИИВЭ разработан аппарат защиты от тока утечек АЗТП, который обеспечивает нормативную электробезопасность при суммарной емкости на стороне регулируемого и нерегулируемого напряжения не более 0,2 мкФ на фазу. Однако такой рабочий диапазон емкости изоляции сети не соответствует ГОСТ-22929-78 [3], который устанавливает, что рудничные аппараты защиты от токов утечки должны быть предназначены для работы в условиях изменения емкости сети – от 0 до 1 мкФ на фазу.

Одним из направлений в предотвращении влияния емкости изоляции сети на защитные характеристики аппарата на переменном оперативном токе является применение фазочувствительных устройств,

выделяющих из оперативного тока его активную составляющую [5]. Однако в известном аппарате защиты от тока утечек типа ПЗВС, работающем на этом принципе, для выделения активной составляющей использовано не все фазочувствительное звено, управляемое не полной величиной вводимого в схему напряжения оперативного источника, а только та его часть, которая приходится непосредственно на контролируемую изоляцию. В результате такое фазочувствительное звено не допускает применения в сети компенсации емкостной составляющей тока утечки для ограничения кратковременных токов до нормативных значений, которые в этом устройстве составляют 210 – 220 мА [5]. Это значительно превышает норматив в 100 мА согласно ГОСТ 22929–78 [3], используемый при определении минимальной безопасности по условию (6).

### Нерешенные части общей проблемы

Основные принципы работы аппарата защиты от тока утечек определяются его защитными характеристиками, которые должны находиться в пределах характеристик к защите от утечек [4]. Это установлено еще проф. Р.М. Лейбовым, являющимся основоположником внедрения в рудничных сетях устройств защиты от утечек тока [4]. Однако до настоящего времени защитные характеристики существующих аппаратов защиты от токов утечки не установлены, что не позволяет проверить выполнение условий достижения ими минимальной безопасности (5) и (6). Для комбинированной сети защитные характеристики должны быть установлены на всех ее участках и выполнено сравнение их с требуемой защитной характеристикой. Получение таких данных для аппаратов защиты, с разными принципами работы, позволило бы научно обосновать направление разработки схемы такого аппарата для комбинированных сетей, так как в настоящее время по этому вопросу существуют противоречия. Так, в работе [6] обосновывается, что аппараты защиты на постоянном оперативном токе не могут обеспечить безопасность сетей с выпрямителями. Одновременно там же утверждается, что «одним из направлений в создании аппаратуры защиты от утечек для сетей с выпрямителями является разработка аппаратов защиты на постоянном оперативном токе на базе существующих аппаратов защиты от утечек в трехфазных электрических сетях переменного тока». В другой работе, например [7], указывается, что «основное направление обеспечения безопасности комбинированных сетей – повышение быстродействия аппарата с учетом того, что он будет одновременно воздействовать на автоматический выключатель передвижной подстанции на преобразователь частоты и отключать отходящую от него кабельную линию при вынесенной системе подачи комбайна». Поскольку в схеме используется существующий аппарат защиты АЗУР–4, работающий на постоянном оперативном токе, то он не может обеспечить безопасность в комбинированных сетях и его применение здесь неправомерно.

Альтернативой аппаратам защиты на постоянном оперативном токе являются аппараты на переменном оперативном токе, которые не имеют отказов при утечках на участке постоянного тока. В аппарате ПЗВС, работающем на переменном оперативном токе, исключено влияние емкости сети на защитные характеристики, так как в нем не применяется компенсация емкостной составляющей тока утечки и кратковременный ток не ограничивается до допустимых по электробезопасности значений.

### Задачи исследования

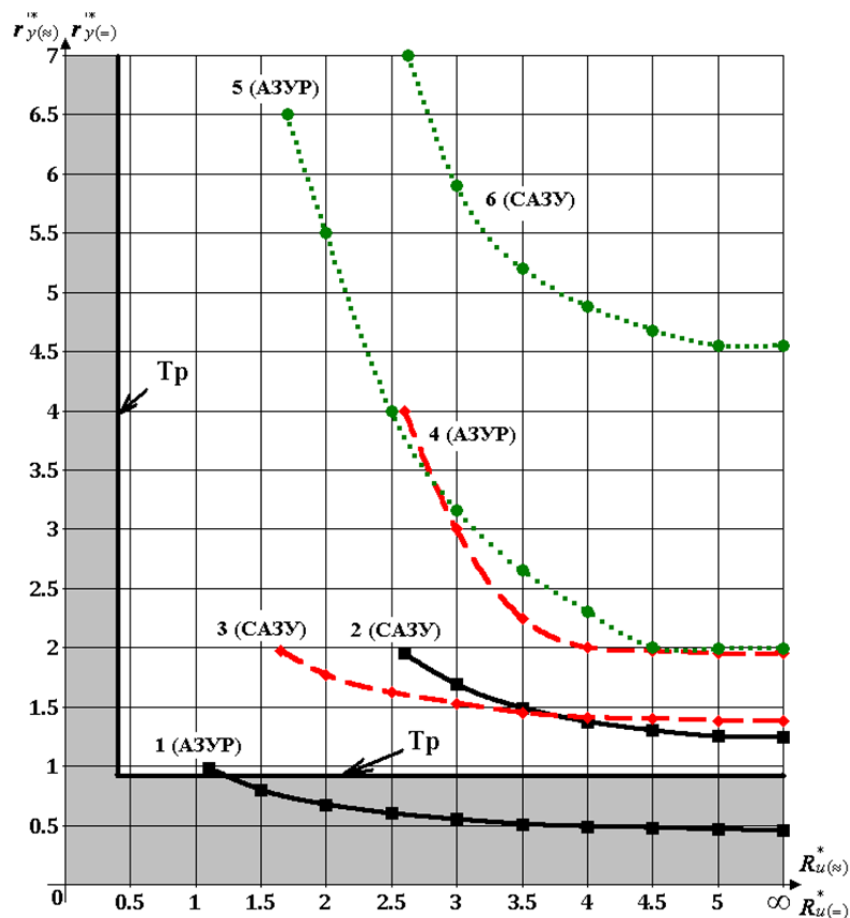
Определение характеристик аппаратов защиты на постоянном оперативном токе АЗАК и САЗУ – 2 в условиях дестабилизирующих факторов комбинированных сетей для оценки возможности использования в них постоянного тока для контроля сопротивлений изоляции и утечек тока.

### Результаты исследования

Для проведения исследования защитных характеристик аппаратов АЗАК и САЗУ – 2, имеющих принципиально различные схемные работы, была создана физическая модель комбинированной сети. Она содержала промышленный выпрямитель и тиристорный преобразователь напряжения, а в качестве их нагрузки использовалась система «двигатель – генератор». Генератор нагружался на балластные сопротивления. Параметры изоляции участков сети принимались сосредоточенными, а их имитация осуществлялась набором соответствующих сопротивлений (резисторов) и конденсаторов. Для испытания аппаратов был задействован метод активного эксперимента. Общие условия и методика испытаний аппаратов защиты соответствовала ГОСТ 22929 [3]. Защитные характеристики представлены в относительных единицах при базовой величине уставки по отключающему сопротивлению утечки

$$r'_{уст} = \frac{U_{\phi}}{I_{дл.д}} = \frac{220В}{25мА} = 8,8 \text{ кОМ.}$$

На рис. 1 изображены защитные характеристики аппаратов САЗУ – 2 (2, 4, 6) и АЗУР – 2 (1, 3, 5) в комбинированной сети, содержащей электропривод постоянного тока, питаемый через нерегулируемый выпрямитель.



**Рис. 1.** Защитные характеристики аппаратов защиты АЗУР и САЗУ – 2 при работе в сети неуправляемого выпрямителя и утечках на стороне питания и выпрямленной стороне,

$$\begin{aligned} \text{где } 1,2 - r_{y(\approx)}^* &= f(R_{u(\approx)}^*); & R_{u(=)}^* &= 11,25; & C_u^{\approx} &= C_u^{\bar{}} = 0; \\ 3,4 - r_{y(\approx)}^* &= f(R_{u(=)}^*); & R_{u(\approx)}^* &= 11,25; & C_u^{\approx} &= C_u^{\bar{}} = 0; \\ 5,6 - r_{y(=)}^* &= f(R_{u(\approx)}^*); & R_{u(=)}^* &= 11,25; & C_u^{\approx} &= C_u^{\bar{}} = 0. \end{aligned}$$

$r_{y(+)}^* = \infty$ ;  $T_p$  – требуемая защитная характеристика по электробезопасности;

$$r_{уст}^* = U_{\phi} / I_{дл.д}; \quad R_{u(кр)} = 3,5 \text{ кОм}$$

Защитные характеристики являются зависимостями однофазной  $r_{y(\approx)}^*$  и однополюсной  $r_{y(=)}^*$  утечек от сопротивления изоляции на участках переменного  $R_{u(\approx)}^*$  и постоянного  $R_{u(=)}^*$  токов. Параметры изоляции на участках, где не создавалась утечка, принимались такими  $R_{u(=)}^* = R_{u(\approx)}^* = 11,25$ . При утечках на отрицательном полюсе выпрямителя сопротивления для обоих аппаратов значительно превышали требуемую защитную характеристику: САЗУ – 2 в 4,5–7 раз; АЗУР – 2 в 2 – 6,5 раз. При утечках на положительном полюсе выпрямителя аппараты АЗУР и САЗУ – 2 не срабатывали, т.е.  $r_{y(+)}^* = \infty$ . Введение емкости в электрическую сеть как до выпрямителя, так и после него практически никакого влияния на отключающие сопротивление утечки аппараты АЗУР и САЗУ – 2 не оказывало. Напряжение выпрямителя даже при высоком симметричном сопротивлении изоляции (99 кОм) на участке выпрямленного напряжения существенно увеличивает отключающие возможности сопротивлений при однофазной утечке до выпрямителя как в аппарате АЗУР, так и САЗУ – 2, т.е. имеет место значительная “перезащита” сети.

Из сравнения защитных характеристик этих аппаратов можно сделать вывод, что они не обеспечивают минимальную безопасность по условию (5) при работе в сети неуправляемого выпрямителя, так как при утечках с положительного полюса выпрямителя имеют место их полные функциональные отказы. При утечках в других точках комбинированной сети аппараты срабатывают со значительным превышением требуемого по условиям электробезопасности значения в 1,5 – 7 раз, т.е. создают неприемлемую по условиям эксплуатации “перезащиту” сети.

Защитные характеристики аппаратов САЗУ – 2 и АЗАК в комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения для регулируемого электропривода постоянного тока снимались для случаев возникновения однофазной утечки до и после выпрямителя ( $r_{y(\approx)}^*$ ,  $r_{y(=)}^*$ ) в зависимости от сопротивления изоляции на участке, где возникла утечка ( $R_{u(\approx)}^*$  или  $R_{u(=)}^*$ ) и величины регулируемого напряжения ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В). На участке где не создавалась утечка, сопротивление изоляции устанавливались равным 99 кОм.

На рис. 2 изображены защитные характеристики аппарата АЗАК при утечке тока до тиристорного регулятора, а на рис. 3 – для аппарата САЗУ – 2.

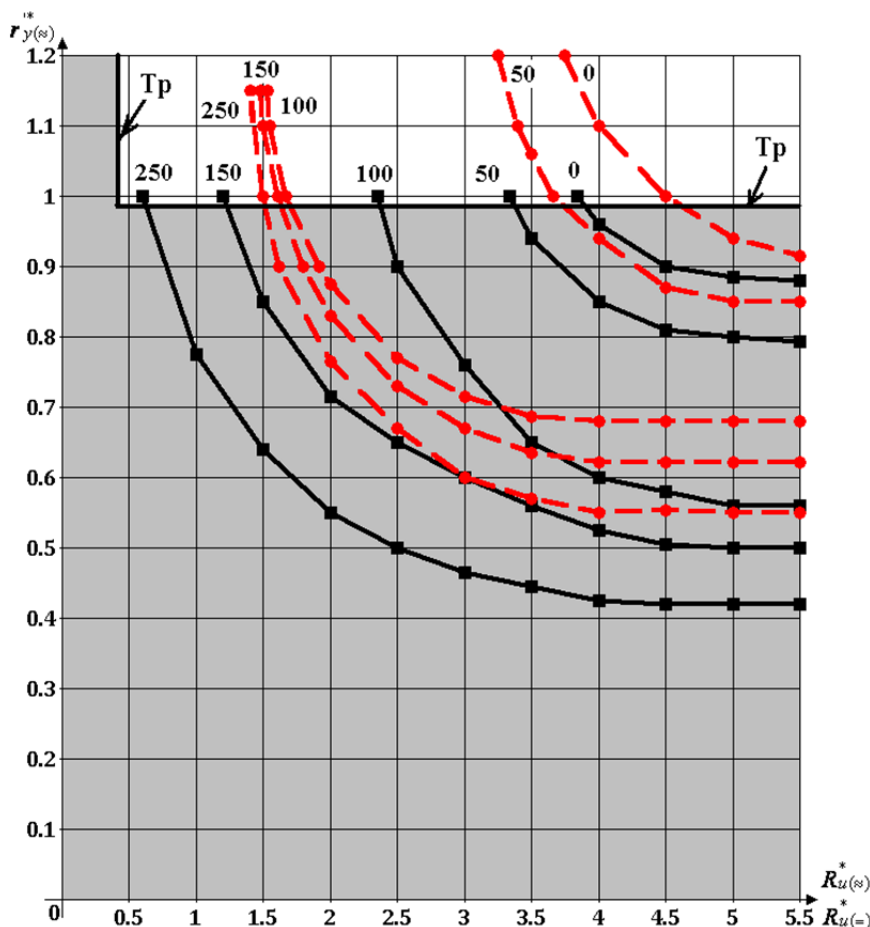


Рис. 2. Защитные характеристики аппарата АЗАК при утечке тока до тиристорного регулятора напряжения в зависимости от регулируемого напряжения ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В) и сопротивления изоляции на участке сети переменного  $R_{u(\approx)}^*$  и постоянного  $R_{u(=)}^*$  токов. Сопротивление изоляции на участке сети без утечки  $R_{u(=)}^*$  или  $R_{u(\approx)}^*$  принималось 11,25 Ом, а емкость изоляции до и после преобразователя – равной нулю.  $T_p$  – требуемая защитная характеристика по электробезопасности (5)

Так как защитные характеристики аппаратов АЗАК и САЗУ – 2 при утечке на участке сети до выпрямителя и при включенном его состоянии находятся существенно ниже характеристик, требуемых по условиям минимальной безопасности (5) (затененная область), то эти аппараты её не обеспечивают. Причем в аппарате САЗУ – 2 при критическом значении сопротивления изоляции (6) имеет место его полный функциональный отказ, т.е. наблюдается несрабатывание.

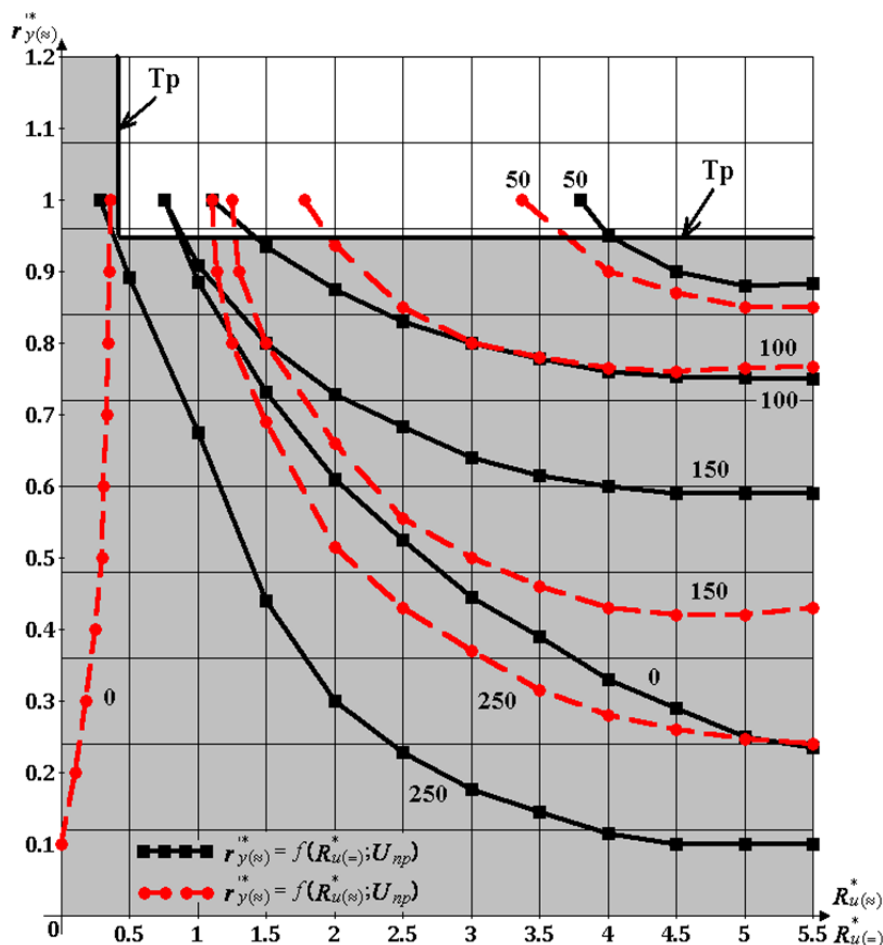


Рис. 3. Защитные характеристики аппарата САЗУ – 2 при утечке тока до тиристорного регулятора напряжения в зависимости от угла регулирования тиристорov ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В) и сопротивления изоляции на участке сети переменного  $R_{u(\infty)}^*$  и постоянного токов  $R_{u(=)}^*$ . Сопротивление изоляции на участке сети без утечки  $R_{u(\infty)}^*$  или  $R_{u(=)}^*$  принималось 11,25 Ом, а емкость изоляции участков до и после преобразователя – равной нулю;  $T_p$  – требуемая защитная характеристика по электробезопасности (5)

Таким образом, защитные характеристики аппаратов АЗАК и САЗУ – 2 (рис. 2 и 3) опровергают существующее мнение, что симметричное сопротивление изоляции на участке постоянного тока никакого влияния на их работу не оказывает.

На рис. 4 и 5 изображены защитные характеристики соответственно аппаратов АЗАК и САЗУ – 2 в комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения на участке сети постоянного тока. Эти защитные характеристики – зависимости предельно отключающего сопротивления тока утечки с положительного или отрицательного полюса тиристорного регулятора в зависимости от:

- 1) сопротивления изоляции на участке промышленной частоты  $R_{u(\infty)}^*$  и напряжения преобразователя

$$U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250 \text{ В};$$

- 2) сопротивления изоляции на участке постоянного тока  $R_{u(=)}^*$  и тех же значений напряжения  $U_{np}$  преобразователя.

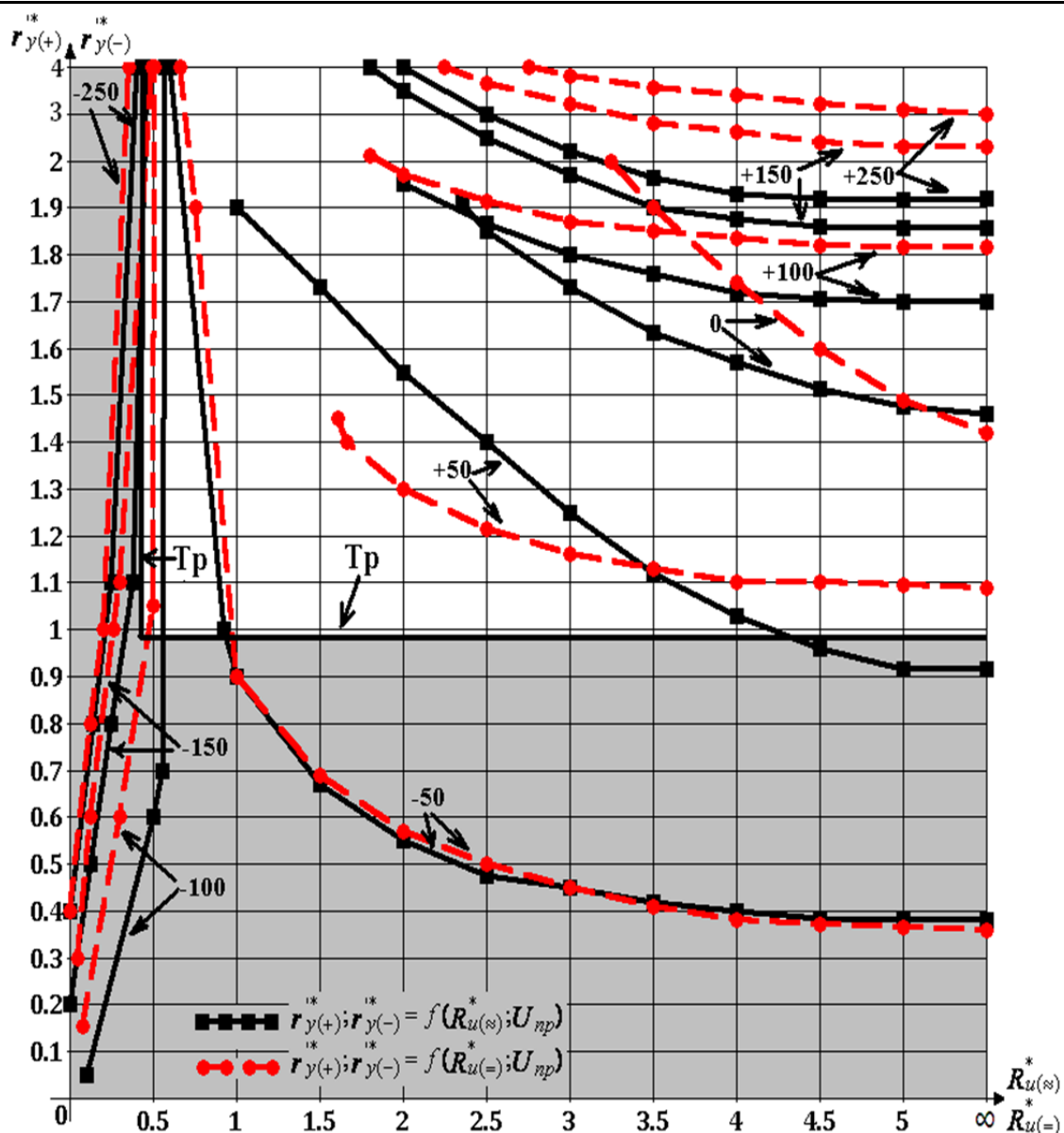


Рис. 4. Защитные характеристики аппарата АЗАК на участке постоянного тока при утечке на положительном и отрицательном полюсах тиристорного регулятора в зависимости от :

- 1) сопротивления изоляции на участке промышленной частоты  $R_{u(≈)}^*$ , напряжения преобразователя на участке ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В):

$$r_{y(+)}^* = f(R_{u(≈)}^*; U_{np}) \text{ и } r_{y(-)}^* = f(R_{u(≈)}^*; U_{np});$$

- 2) сопротивление изоляции участка постоянного тока  $R_{u(=)}^*$ , напряжения преобразователя ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В):

$$r_{y(+)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}) \text{ и } r_{y(-)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}).$$

- 3) сопротивление изоляции на участке без утечки тока:

$$R_{u(=)}^* = R_{u(≈)}^* = 11,25 \text{ Ом; емкость изоляции участков сети: } C_u = 0$$



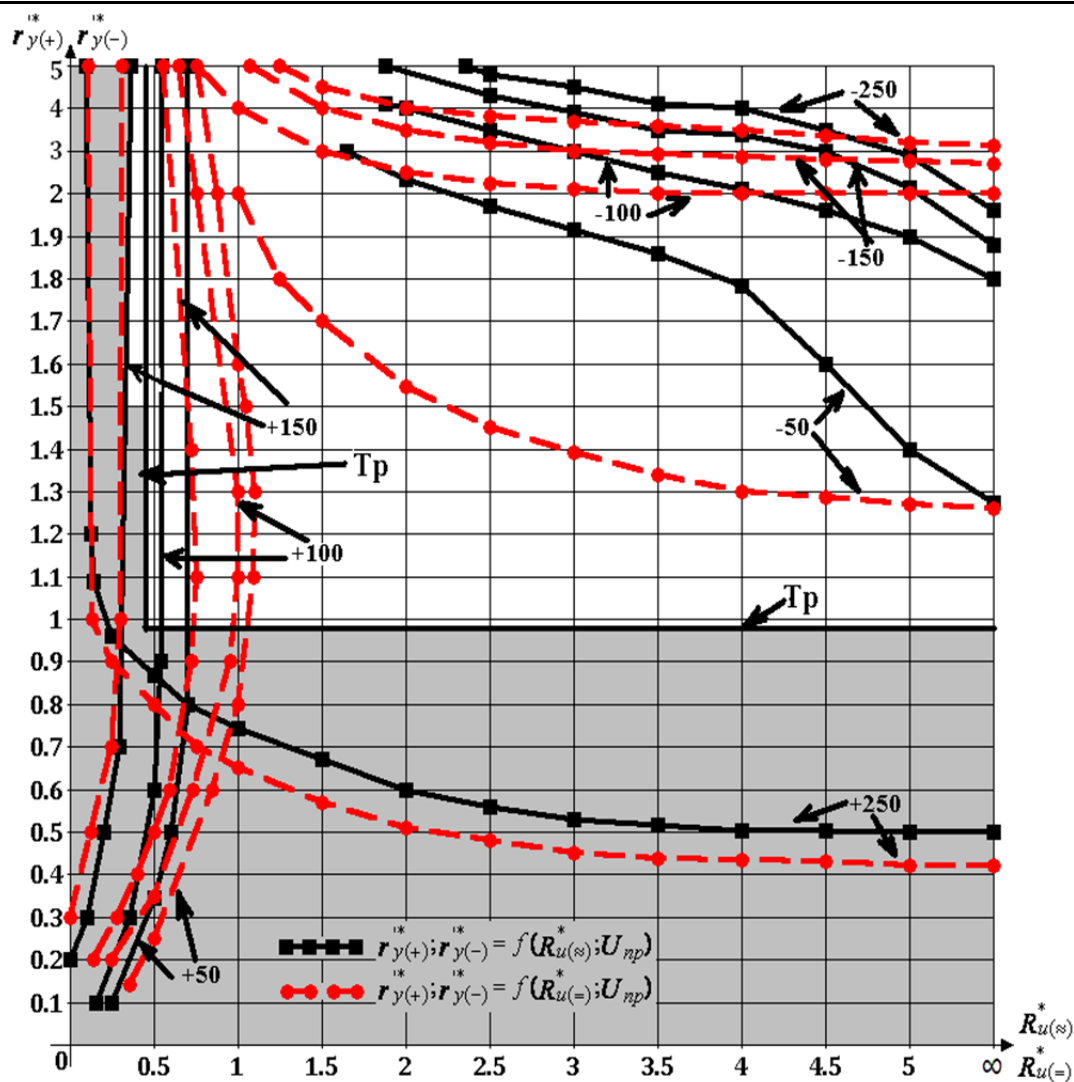


Рис. 5. Защитные характеристики аппарата САЗУ – 2 на участке постоянного тока при утечке на положительном и отрицательном полюсах тиристорного регулятора в зависимости от :

1) сопротивления изоляции на участке промышленной частоты  $R_{u(≈)}^*$ , напряжения преобразователя ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В):

$$r_{y(+)}^* = f(R_{u(≈)}^*; U_{np}) \text{ и } r_{y(-)}^* = f(R_{u(≈)}^*; U_{np});$$

2) сопротивление изоляции участка постоянного тока  $R_{u(=)}^*$ , напряжения преобразователя ( $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250$  В):

$$r_{y(+)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}) \text{ и } r_{y(-)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}).$$

3) сопротивление изоляции участка без утечки  $R_{u(=)}^* = R_{u(≈)}^* = 11,25$  Ом; емкость изоляции участков сети  $C_u = 0$ .

Из сравнения защитных характеристик АЗАК (рис. 4) и САЗУ – 2 (рис. 5) видно, что влияние однополюсных утечек тока на их защитные характеристики практически одинаково. При утечке тока с положительного полюса тиристорного регулятора защитные характеристики аппаратов располагаются значительно ниже требуемой по условиям электробезопасности, а в зоне критического сопротивления изоляции они имеют разрыв, т.е. наблюдается несрабатывание. При утечке тока с отрицательного полюса регулятора защитные характеристики аппаратов АЗАК и САЗУ – 2 располагаются значительно выше требуемой, т.е. имеет место “перезащита” сети в 2–7 раз, что не приемлемо по условиям эксплуатации.

Таким образом, характеристики аппаратов защиты на постоянном оперативном токе не удовлетворяют требованиям электробезопасности и условиям эксплуатации сети в условиях дестабилизирующих

факторов комбинированных сетей. Поэтому направления создания аппаратуры защиты от утечек тока для сетей с преобразователями энергии на базе существующих аппаратов от утечек в трехфазных электрических сетях, т.е. аппаратов на постоянном оперативном токе являются *бесперспективными*. Необходимо рассматривать пути разработки аппаратуры защиты для этих сетей на переменном оперативном токе, выделяя и контролируя его активную составляющую [5].

**Выводы:**

1. В комбинированной сети с неуправляемым выпрямителем защитные характеристики аппарата защиты на постоянном оперативном токе существенно отличаются от требуемой по условиям электробезопасности. На участке промышленной частоты  $r'_{yo} = f(R_{u(\approx)})$  уже при сопротивлении симметричной изоляции 99 кОм на участке постоянного тока для аппарата САЗУ – 2 они проходят в зоне значений, значительно выше требуемых (2 – 5 раз), а для аппарата АЗАК – в зоне значений, меньших половины требуемых. Зависимость отключающих однофазных сопротивлений изоляции на участке постоянного тока  $r'_{yo} = f(R_{u(=)})$  отличается от требуемой в (2 – 7) раз.
2. В комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения защитные характеристики исследуемых аппаратов на участке промышленной частоты в зависимости от параметров симметричной изоляции на участке промышленной частоты  $r'_{yo} = f(R_{u(\approx)})$  и постоянного тока  $r'_{yo} = f(R_{u(=)})$  проходят существенно ниже требуемой, т.е. электробезопасность не обеспечивается. Причем, у аппарата САЗУ – 2 имеет место функциональный отказ при напряжении выпрямителя  $U_{np} = 0$ , вплоть до критического значения сопротивления изоляции.
3. В комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения защитные характеристики исследуемых аппаратов на участке постоянного тока с отрицательного и положительного полюса в зависимости от сопротивлений симметричной изоляции на участках промышленной частоты  $r_{yo}^+ ; r_{yo}^- = f(R_{u(\approx)})$  и постоянного тока  $r_{yo}^+ ; r_{yo}^- = f(R_{u(=)})$  имеют разрывы, причем их участки проходят как выше, так и ниже требуемой защитной характеристики.
4. Защитные характеристики исследованных аппаратов защиты на постоянном оперативном токе в условиях дестабилизирующих факторов комбинированных сетей не подтверждают факта дестабилизации их работы только несимметричными утечками на участке постоянного тока. Установлено, что и сопротивление аппарата сильно дестабилизирует работу таких аппаратов при утечках на стороне до преобразователя.
5. Направление создания аппаратуры защиты от утечек тока для сетей с преобразователями энергии на базе существующих аппаратов защиты на постоянном оперативном токе следует признать бесперспективным. Альтернативой этому является разработка для этих сетей аппаратуры на переменном оперативном токе при выделении и контроле его активной составляющей.

**Список литературы**

1. ГОСТ ССБТ 12.4.155–85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические условия. Дата введения: 1986–01–01.
2. ГОСТ ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Дата введения: 1983–01–01.
3. ГОСТ 22929. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Введен 1979–01–01.
4. Лейбов Р.М. Утечки в шахтных электрических сетях / Р.М. Лейбов. – М. Углетехиздат, 1952, 363с.
5. Кямпо Е.М. Исследование и разработка аппаратуры защиты от утечек тока для тиристорного электропривода горных машин. Автореф. дис. канд. техн. наук / Е.М. Лейбов // Восточный НИИ по безопасности работ в горной промышленности.–Кемерово, 1985, 24с.
6. Дзюбан В.С. О защите от утечек сетей, питающих через выпрямители электроприводы постоянного тока / В.С. Дзюбан, В.П. Кононенко, Л.А. Леонтьева. // ВНИИВЭ. Сб. научн. трудов “Взрывозащищенное электрооборудование (разработка и исследование)”. Вып. 12.– Донецк, 1976, с. 24–29.
7. Савицкий В.Н. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях электроснабжения очистных комбайнов / В.Н. Савицкий, А.И. Белошистов, Н.И. Стадник, А.В. Сергеев. // Уголь Украины.–2007. – №12(612), с.23–25.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*