

УДК 621.316

В.М. Гвоздь, к.т.н., доц., Е.А. Тищенко, к.т.н., доц., А.Г. Баракин, к.т.н., доц.,  
А.П. Марченко,

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля НУГЗ Украины

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И СТРУКТУРНЫХ СХЕМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ БЕСКОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В статье рассмотрены вопросы повышения пожарной и техногенной безопасности промышленных электроустановок. Проведен всесторонний анализ существующих систем защиты электрических сетей и электроустановок. Повышение пожарной и техногенной безопасности эксплуатации электроустановок достигается путем разработки комплексных бесконтактных быстродействующих систем защиты, которые контролируют все возможные аварийные режимы, возникающие в процессе их работы.

**Ключевые слова:** электроустановки, пожарная и техногенная безопасность, аварийные режимы, аппараты защиты, обрыв фазы, перенапряжение, перегрузка по току, короткое замыкание.

**Постановка проблемы.** Для обеспечения пожарной и техногенной безопасности промышленных объектов в настоящее время высокими темпами развиваются системы управления, контроля и защиты силовых энергетических установок с использованием силовых полупроводниковых ключей и микроконтроллеров.

Каждая силовая энергетическая установка может являться причиной технологической аварии, пожара, взрыва, а на химических предприятиях аварии в электроустановках могут привести к экологическим катастрофам [1].

Наиболее распространенными способами защиты электрооборудования технологических процессов является установка предохранителей, магнитных пускателей с тепловыми реле, а также автоматических выключателей. Общеизвестны недостатки этих устройств. Одним из основных недостатков этих аппаратов является наличие подвижных механических контактов. Контакты со временем окисляются, подвергаются механическому износу, в результате чего возрастает переходное сопротивление контактов. При повышении переходного сопротивления контактов увеличивается их температура, что может привести к пожару. Кроме того, возникает эффект сваривания контактов, который приводит к выходу из строя пускорегулирующей аппаратуры и полной потере защитных свойств. Очень опасны межвитковые замыкания в катушке контактора магнитного пускателя, приводящие к загоранию катушки.

Процесс размыкания контактов, особенно при больших величинах электрического тока, сопровождается электрическим разрядом между контактами. Если в отключаемой цепи ток и напряжение между контактами больше, чем критические для данных условий, то между контактами возникает дуга, продолжительность горения которой зависит от параметров цепи и условий деионизации дугового промежутка. Образование дуги при размыкании медных контактов возможно уже при токе 0,4-0,5 А и напряжении 15 В.

Проводимость плазмы приближается к проводимости металлов. В створе дуги проходит большой ток и создается высокая температура. Плотность тока может достигать 10 000 А/см<sup>2</sup> и более, а температура - от 6000 К при атмосферном давлении до 18000 К и более при повышенных давлениях. Чем больше ток в дуге, тем меньше ее сопротивление, а поэтому требуется меньшее напряжение для горения дуги, т. е. дугу с большим током погасить труднее. В коммутационных аппаратах необходимо не только разомкнуть контакты, но и погасить возникшую между ними дугу. Наличие дуги при размыкании

контактов в коммутационных аппаратах приводит к ограничению их использования во взрывоопасных зонах.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Требования, предъявляемые к аппаратам защиты электрических сетей и электроустановок, изложены [2,3]. Методики выбора и расчета параметров предохранителей, автоматических выключателей и магнитных пускателей рассмотрены в литературе [2]. Они распространяются на трехфазные электроустановки напряжением до 1 кВ промышленной частоты, присоединенные к энергосистеме, или к автономным источникам энергии и определяют общую методику расчета токов симметричных и несимметричных коротких замыканий в начальный и произвольный моменты времени с учетом параметров синхронных и асинхронных машин, трансформаторов, реакторов, кабельных и воздушных линий, шинопроводов и узлов комплексной нагрузки. Кроме вышесказанного, контактные аппараты защиты могут реагировать на отклонения величины напряжения в электрической цепи [4,5] при наличии реле напряжения, однако принцип размыкания электрической цепи остается тем же самым.

**Постановка задачи и ее решение.** Повышение пожарной и техногенной безопасности эксплуатации электроустановок может быть достигнуто путем разработки комплексных бесконтактных быстродействующих систем защиты, которые могут контролировать все возможные аварийные режимы, возникающие в процессе работы электрооборудования рис.1.

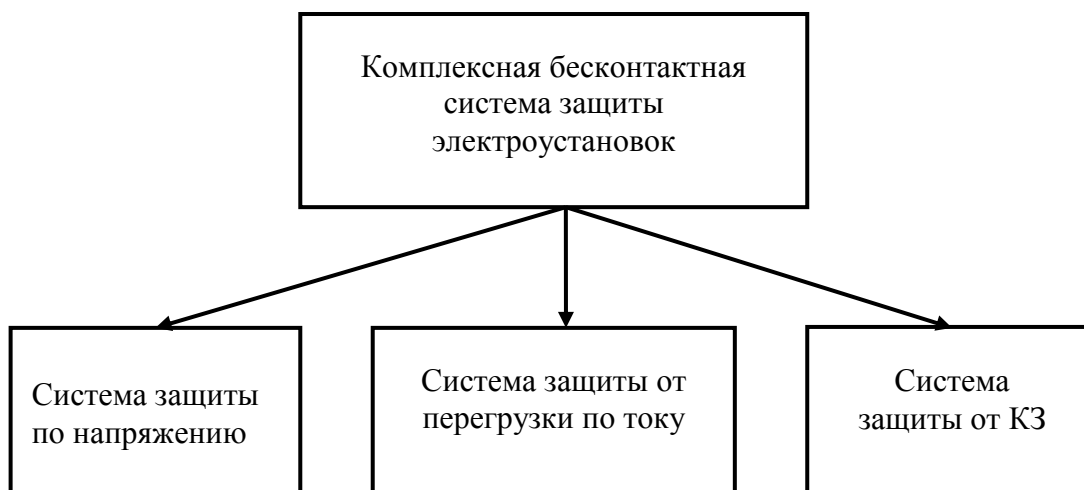


Рисунок 1 – Структурная схема комплексной бесконтактной системы защиты.

Для создания быстродействующих систем защиты электроустановок рис.1. необходимо вести постоянный контроль за мгновенными значениями напряжений и токов в фазах электрической сети. Это осуществляется с помощью датчиков напряжения и тока, гальванически развязанных с силовой электрической сетью.

**Изложение основного материала исследования.** Комплексная бесконтактная быстродействующая система защиты должна контролировать и отключать электроустановку в следующих аварийных режимах: пропадание (обрыв) фазы в трехфазной электрической сети; перекос фаз в трехфазной электрической сети; перенапряжения в электрических сетях; снижение напряжения в силовых фазах ниже допустимого значения; токовая перегрузка; короткое замыкание.

Размыкание силовых электрических цепей в аварийных режимах производят силовые полупроводниковые ключи, поэтому исключается возможность возникновения электрической дуги.

Структурная схема системы защиты, обеспечивающая контроль всех возможных аварийных режимов, представлена на рис.2.

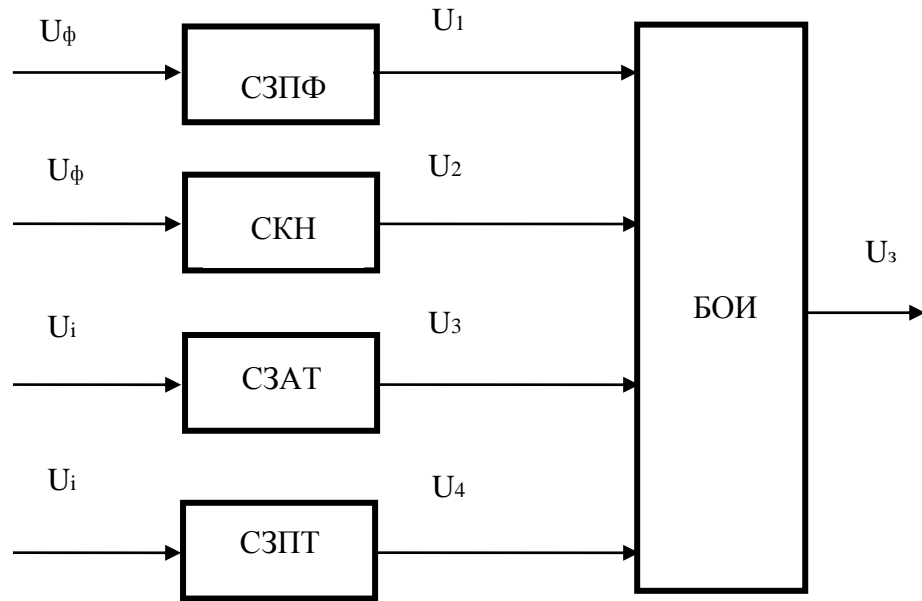


Рисунок 2 – Структурная схема системы защиты.

Структурная схема комплексной системы защиты включает в себя следующие подсистемы:

- система защиты от пропадания фазы и появления несимметрии питающих фазных напряжений (СЗПФ);
- система контроля величины напряжения (СКН) ;
- система защиты от аварийных токов короткого замыкания (СЗАТ);
- система защиты от токов перегрузки (СЗПТ)
- блок обработки информации (БОИ).

На вход системы защиты поступают сигналы, пропорциональные мгновенным значениям фазных напряжений  $U_\phi$ , и сигналы с датчиков тока фаз, пропорциональные мгновенным значениям электрического тока в фазах нагрузки  $U_i$ .

Система защиты от пропадания (обрыва) фазы и появления несимметрии силового напряжения основана на постоянном анализе мгновенных значений напряжений питания электроустановки во всех трех фазах. На рис.3. представлена векторная диаграмма напряжений в трехфазной электрической сети. На первой диаграмме - при наличии все трех фаз напряжений -  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , а на второй - при пропадании напряжения в фазе С.

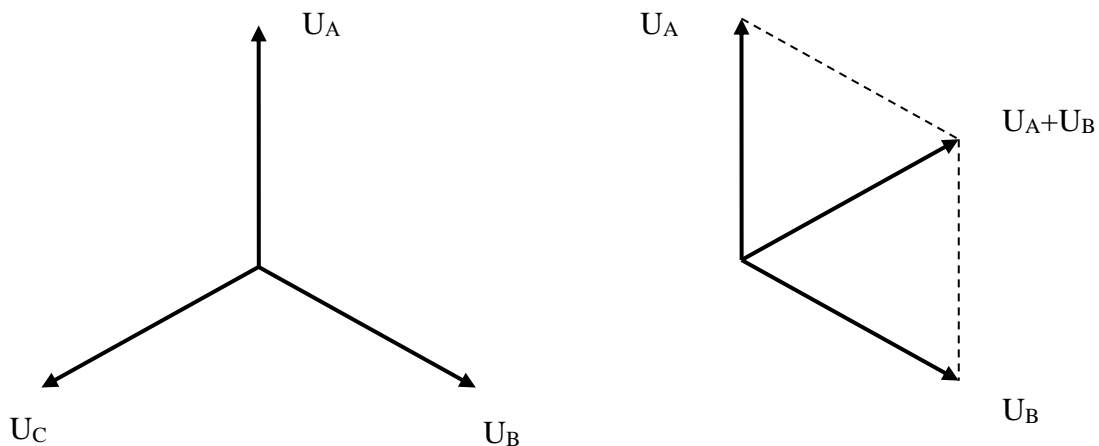


Рисунок 3 – Векторная диаграмма трехфазной сети при обрыве фазы.

Особенностью трехфазных цепей переменного тока является то, что в любой момент времени при отсутствии аварийных режимов сумма мгновенных значений напряжений во всех трех фазах равна нулю.

$$U_a(t) + U_b(t) + U_c(t) = 0. \quad (1)$$

На рис.4. представлена структурная схема (СЗПФ), в основе работы которой лежит контроль за выполнением равенства (1).

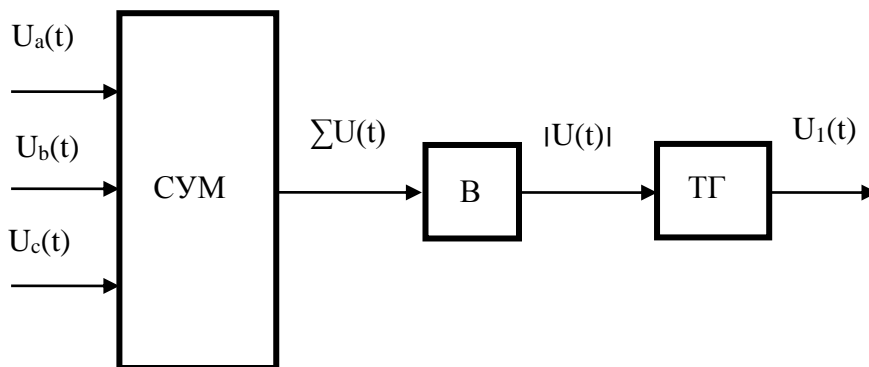


Рисунок 4 – Структурная схема системы защиты от пропадания фазы и появления несимметрии силового напряжения.

На вход системы защиты с датчиков фазных напряжений подаются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям фазных напряжений. При обрыве (пропадании) какой-нибудь из фаз, или нарушении симметрии силового напряжения нарушается выполнение равенства (1), на выходе сумматора (СУМ) появляется сигнал, отличный от нуля. Выпрямитель (В) предназначен для получения модуля этого сигнала  $|U(t)|$ . Сигналом  $|U(t)|$  запускается триггер с гистерезисом (ТГ), который формирует сигнал  $U_1(t)$ , блокирующий выработку импульсов управления на силовые ключи, что приводит к защитному отключению электрооборудования от напряжения питания. Величина гистерезиса триггера определяет порог срабатывания системы защиты.

Вторым аварийным режимом является нестабильность питающего напряжения. На практике используют два вида норм качества электроэнергии: нормально допустимые и предельно допустимые. Допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии равны соответственно  $\pm 5$  и  $\pm 10\%$  от номинального напряжения сети.

Система контроля величины питающего напряжения имеет два порога отключения электроустановки от напряжения питания:  $U_{\text{пmax}}$  – максимальное пороговое напряжение;  $U_{\text{пmin}}$  – минимальное пороговое напряжение. Для номинального фазного напряжения  $U_n$ , условия срабатывания системы контроля величины питающего напряжения можно записать следующим образом:

$$1,41 \cdot 1,05 U_n \leq U_{\text{пmax}} \leq 1,41 \cdot 1,1 U_n \quad (2)$$

$$1,41 \cdot 0,9 U_n \leq U_{\text{пmin}} \leq 1,41 \cdot 0,95 U_n \quad (3)$$

Определим быстродействие срабатывания системы защиты при различных параметрах нагрузки.

Временные диаграммы работы системы защиты СКН показаны на рис.5. На временной диаграмме рис.5,а представлены временные диаграммы процесса отключения напряжения и тока в нагрузке при возникновении перенапряжения в электрической сети.

Рассмотрим случай произвольного значения реактивности нагрузки для случая, когда силовое напряжение возрастает больше минимального порогового значения и определяется неравенством (2).

Момент времени  $t_1$  определяется фазовым сдвигом тока нагрузки относительно питающего напряжения в установившемся режиме в соответствии с выражением:

$$t_1 = 5,6 \cdot 10^{-5} \arctg \frac{X_{LH}}{R_H}, \quad (4)$$

где:  $X_{LH}$  – индуктивное сопротивление нагрузки;  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки. На диаграмме рис.5,б представлен импульс управления силовым ключом  $V_1$  и логический сигнал  $U_2(t)$  – запрещающий управляющие импульсы силовыми ключами. В момент времени  $t_2$  происходит включение системы защиты из-за достижения силовым напряжением порогового значения срабатывания защиты. Момент времени  $t_3$  характеризуется уменьшением тока в нагрузке до нуля и отключением питающего напряжения от нагрузки. Быстродействие системы срабатывания защиты можно определить по формуле, которая следует из временной диаграммы рис.5,а:

$$t_{омк} = t_3 - t_2 = 5 \cdot 10^{-3} + 5,6 \cdot 10^{-5} \arctg \frac{X_{LH}}{R_H}. \quad (5)$$

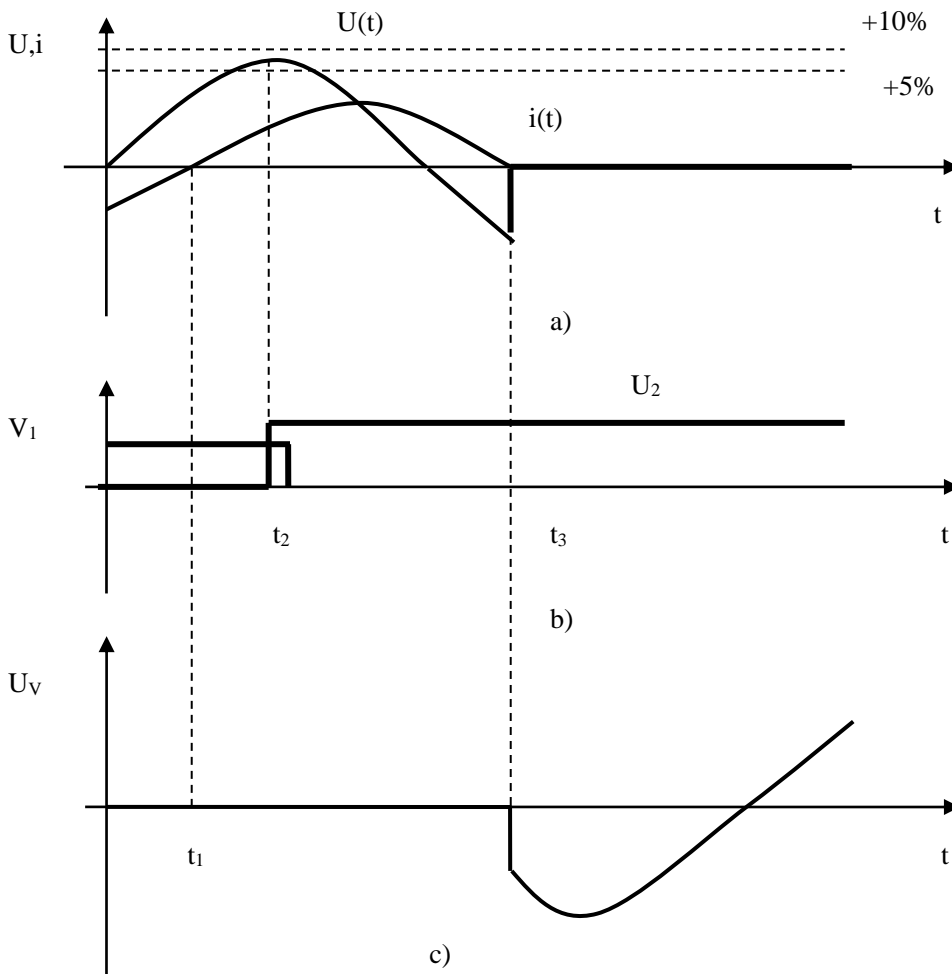


Рисунок 5 – Временные диаграммы работы СКН.

На діаграмме рис.5,с показано напруга на силовому ключі, максимальна величина якого визначає клас по напругі силового ключа.

Залежність часу спрацювання системи захисту від параметрів навантаження представлена на рис. 6. Из графика видно, что при чисто активной нагрузке быстродействие системы составляет 5 мс, с ростом реактивности нагрузки быстродействие системы защиты падает и при чисто индуктивной нагрузке составляет 10 мс.

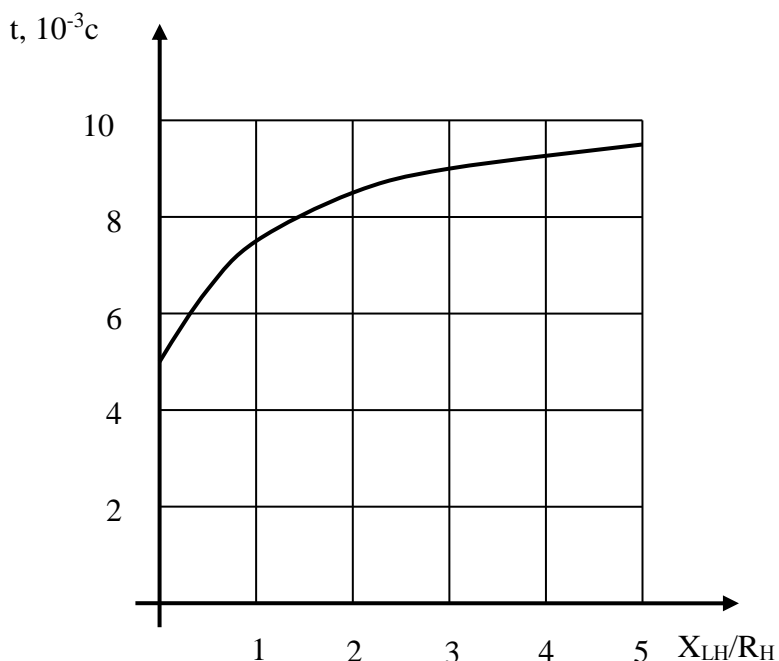


Рисунок 6 – Быстродействие СКН.

Система защиты от аварийных токов короткого замыкания обеспечивает отключение электроустановки при возникновении аварийного режима короткого замыкания. Вероятность возникновения однофазных коротких замыканий наиболее высока и составляет более 60% от общего количества КЗ. Двухфазные КЗ, в том числе на землю, возникают реже, вероятность возникновения данной аварийной ситуации - 20%. Трехфазные КЗ встречаются достаточно редко, вероятность их возникновения – 10%. Порог срабатывания защиты устанавливается в зависимости от вида электрооборудования подключенного к электрической сети, класса пожароопасной или взрывоопасной зоны сечения и вида электропроводки [2,6].

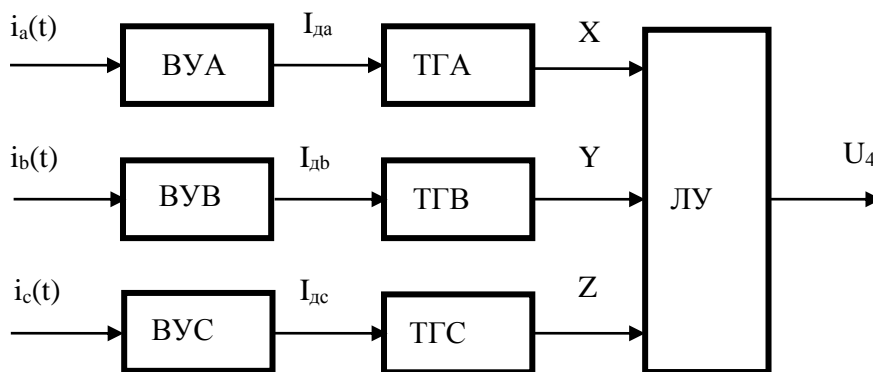


Рисунок 7 – Структурная схема системы защиты от токов перегрузки.

Структурная схема системы защиты от токов перегрузки представлена на рис.7. Контроль действующего значения величины электрического тока осуществляется в каждой силовой фазе посредством вычисления действующего значения тока в вычислительных устройствах (ВУА, ВУВ, ВУС) на каждом периоде изменения мгновенного значения электрического тока в соответствии с формулой:

$$I_{д} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}, \quad (6)$$

где:  $I_{д}$  – действующее значение электрического тока;  $T$  – период изменения тока;  $I_m$  – максимальное значение тока;  $\omega$  – круговая частота.

Сигналы с выхода вычислительных устройств, пропорциональные величинам действующих значений токов в фазах, поступают на входы триггерных устройств (ТГА, ТГВ, ТГС), величина гистерезиса которых определяет порог срабатывания системы защиты. В логическом устройстве (ЛУ) осуществляется логическая операция ИЛИ в соответствии с уравнением

$$U_4 = X + Y + Z. \quad (7)$$

Применение вычислительных устройств в силовых фазах питающей сети позволяет значительно повысить быстродействие систем защиты.

**Выводы.** В работе показана возможность реализации повышения пожарной и техногенной безопасности эксплуатации электроустановок. Это достигается путем разработки комплексных бесконтактных быстродействующих систем защиты, которые контролируют все возможные аварийные режимы, возникающие в процессе работы.

Предложенная быстродействующая бесконтактная система защиты контролирует наличие всех фаз напряжения, их симметрию, отклонение величины напряжения от номинального значения, мгновенные значения электрических токов в фазах нагрузки, действующие значения токов в фазах и осуществляет отключение электроустановки от питающего напряжения при отклонении любого из контролируемых параметров на величину большую, чем допустимое значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздь В.М. Повышение техногенной безопасности технологического процесса синтеза аммиака./В.Д. Акиншин, А.Г. Баракин, О.В. Квашнина//Пожежна безпека: теорія і практика. —2013. —№13. — С. 12—17.
2. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене — Х.: Вид-во «Форт», 2011.— 736 с.
3. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ, 1998. — 380 с.
4. В. М. Weedy. Electric Power Systems Second Edition. John Wiley and Sons, London, 1972, ISBN 0-471-92445-8 pp. 428-430
5. Михайлов В.В. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты / В. В. Михайлов, Е. В. Киричевский, Е.М. Ульяницкий.—М.: Энергоатомиздат, 1998. — 185 с.
6. Дулин И.А. Быстродействующая максимальная токовая защита в электросети шахтного участка./ Ковалёва И.В.// ДОНБАС-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених: VI Міжнародна науково-практична конференція, зб. наук. праць – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – с. 271-274.