

*А.Г. СЕРЕДА*, канд. техн. наук, доц.; НТУ "ХПИ"

*И.С. ВАРШАМОВА*, ассистент; НТУ "ХПИ"

*В.В. ЛИТВИНЕНКО*, ассистент; НТУ "ХПИ"

## **ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Обоснована актуальность повышения чувствительности аппаратов релейной защиты к токам удаленных коротких замыканий при реализации дальнего резервирования отказов защит. Показано, как цифровая обработка сигналов от датчиков тока позволяет расширить возможности реализуемых защит в расцепителях автоматических выключателей. Подтверждена эффективность извлечения дополнительной информации о процессах в электрической цепи по степени искажения фазных токов в переходном режиме. Доказана возможность идентификации вида броска тока в переходном режиме возникновения возмущения электрической цепи. Предложен критерий блокировки срабатывания автоматических выключателей при прямом пуске асинхронных электродвигателей. Дано научно-техническое обоснование применения комплексного критерия идентификации пускового тока асинхронного электродвигателя. Приведен алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты при блокировании срабатывания автоматических выключателей для обеспечения гарантированного пуска и разгона асинхронного электродвигателя.

**Ключевые слова:** дальнейшее резервирование, микропроцессорный расцепитель, релейная защита.

**Введение.** Защита распределительных сетей электроснабжения кораблей от токов коротких замыканий (КЗ) преимущественно обеспечивается автоматическими выключателями (АВ) с различной выдержкой времени на отключение на различных ступенях селективной защиты. Существующий ступенчато-временной принцип селективной защиты формирует некорректную времятоковую характеристику всей системы защиты с точки зрения обеспечения пожарной безопасности [1], [2]. При ступенчато-временной селективной защите, чем ближе к источнику питания расположен выключатель и больше ожидаемый ток КЗ, тем больше принудительная выдержка времени на отключение. При этом существенно возрастает термическое и динамическое действие аварийного тока на элементы электрической цепи, а также энергия электрической дуги. Это затрудняет обеспечение высокого уровня пожарной безопасности электроустановок. Более совершенной будет защитная характеристика, когда при переходе на более высокую ступень

защиты, ближе к источнику питания время срабатывания не увеличивается [2], [3].

Кроме того, принудительная задержка срабатывания выключателя вышестоящего к источнику питания по сравнению со временем отключения тока КЗ выключателем нижестоящим к потребителю в системе селективной защиты существенно усложняет возможность повышения надежности защиты за счет дальнего резервирования отказов [4]. Суть дальнего резервирования (ДР) заключается в том, что при отказе любого выключателя резервная защита аварийного участка электрической цепи осуществляется выключателем, расположенным на более высокой ступени защиты [5]. Надежность защиты участка электрической сети определяется вероятностью безотказной работы выключателя, защищающего этот участок. Гарантированное производителем значение 0,95 вероятности безотказной работы АВ при выполнении защитных функций не соответствует современным требованиям. Поэтому важным направлением повышения надежности является переход к защите не одним, а системой из двух аппаратов. Согласно [6], при вероятности безотказной работы каждого аппарата, равной 0,95, вероятность безотказной работы системы защиты из двух таких аппаратов составляет 0,9975. Таким образом, при реализации ДР вероятность отказов защиты существенно снижается. Чтобы обеспечить такой высокий показатель надежности, необходимо обеспечить близкие времена срабатывания верхней и нижней ступеней защиты. Это значит, что на всех ступенях защиты выключатели должны иметь одинаковую чувствительность к токам КЗ, особенно удаленным. При ступенчато-временном принципе селективной защиты время срабатывания селективного выключателя, установленного ближе к источнику, может быть недопустимо большим, чем время срабатывания выключателя, установленного ближе к нагрузке. В связи с этим требование высокого быстродействия селективной защиты необходимой для повышения уровня пожарной безопасности электроустановок и надежности токовой защиты трудно обеспечить.

**Актуальность.** Недостатки существующей координации аппаратов релейной защиты показаны на примере системы защиты судовой электроустановки, приведенной на рис. 1 [7], [8]. Источником электроэнергии 0,4 кВ является основной  $G_1$  и резервный  $G_2$  генераторы. При питании электроустановки от генератора  $G_1$  защита имеет четыре ступени селективности. В распределительном щите РЩ на IV оконечной ступени защиты установлены выключатели QF<sub>4,1</sub>-QF<sub>4,2</sub> типа АК-50Б. Для выключателей АК-50Б на номинальный рабочий ток  $I_{r4} = (8-25)A$

ток предельной коммутационной способности составляет  $I_{cu} = 11 \text{ кА}$  [9], поэтому за выключателем III ступени установлен реактор, ограничивающий ток КЗ до  $I_{cc} = 10 \text{ кА}$ . Время отключения указанного тока выключателем АК-50Б составляет примерно 20 мс. На III ступени расположен выключатель  $QF_{3,1}$  типа А3724СМ на номинальный ток  $I_{r3} = 250 \text{ А}$  с принудительной выдержкой времени на отключение  $t_{sd3} = 0,1 \text{ с}$ . В главном распределительном щите ГРЩ на II ступени установлен выключатель  $QF_{2,2}$  типа А3794СМ на номинальный ток  $I_{r2} = 630 \text{ А}$  с выдержкой времени на отключение  $t_{sd2} = 0,25 \text{ с}$ . Выключатели I ступени  $QF_{1,1}$  и  $QF_{1,2}$  типа ВА55-43 на номинальный рабочий ток  $I_{r1} = 1250 \text{ А}$  имеют выдержку времени срабатывания  $t_{sd1} = 0,4 \text{ с}$ . Предельный ток селективности выключателей ВА55-43 равен  $I_{cu} = 33,5 \text{ кА}$  [10], поэтому для обеспечения полной селективности [11] ниже его установлен реактор, ограничивающий ток КЗ до  $I_{cc} = 30 \text{ кА}$ .

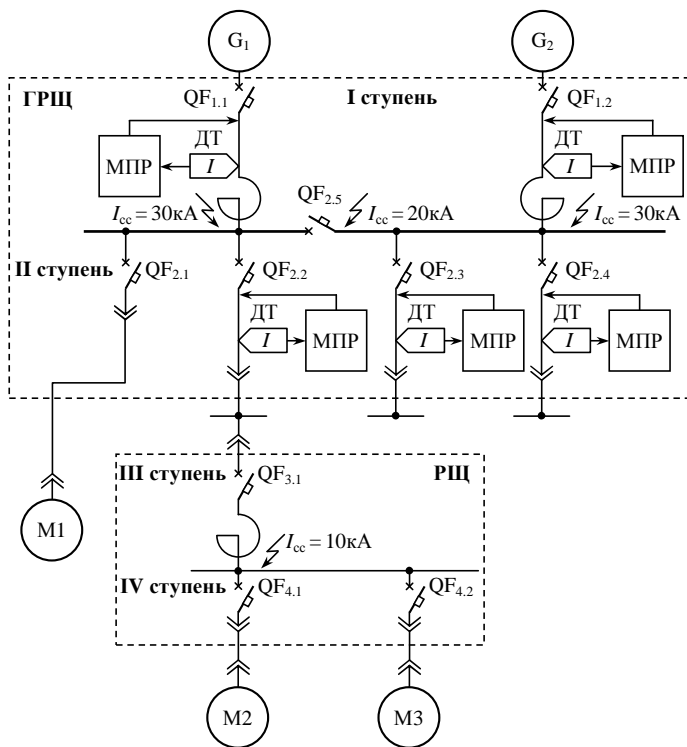


Рис. 1. Фрагмент схемы судовой системы электроснабжения.

Чтобы выключатель  $QF_{1,1}$  первой степени защиты с рабочим током 1250 А имел достаточную чувствительность для резервной защиты участка электрической цепи, защищаемой нижестоящим выключателем  $QF_{2,2}$ , токовые уставки их микропроцессорных расцепителей (МПП) в зоне токов КЗ должны быть равны  $I_{sd1} = I_{sd2}$ . Однако, выбранная по условию пуска электродвигателя М1 уставка  $I_{sd1} = 3750$  А выключателя  $QF_{1,1}$  оказывается больше уставки  $I_{sd2} = 1260$  А выключателя  $QF_{2,2}$ . Очевидно, что в диапазоне токов КЗ от 1260 А до 3750 А вышестоящий выключатель  $QF_{1,1}$  не может защитить участок электрической цепи за выключателем  $QF_{2,2}$  в случае отказа последнего. Аналогичная ситуация имеет место на других ступенях защиты. На рис. 2 обозначены зоны токов КЗ, в которых вышестоящий выключатель не выполняет функцию резервной защиты участка цепи, когда нижестоящий выключатель отказал.

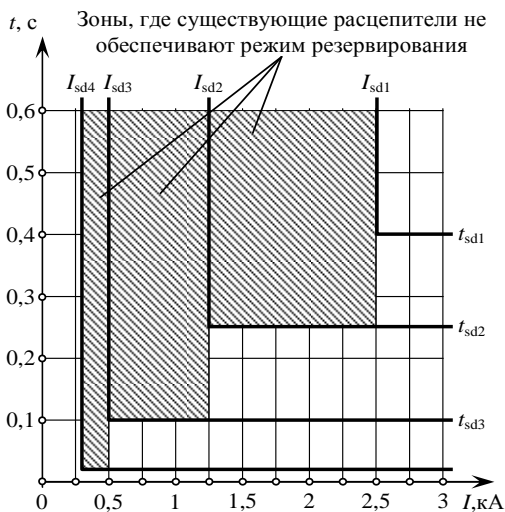


Рис. 2. Карта селективности четырехступенчатой защиты

**Цель статьи:** повышение чувствительности аппаратов релейной защиты к токам КЗ путем использования дополнительных критериев идентификации аварийных режимов с целью обеспечения селективности и дальнего резервирования отказов защит.

**Материалы исследования.** Повысить чувствительность аппаратов защиты к токам КЗ можно путем отстройки от пусковых токов мощных асинхронных электродвигателей (ЭД), значения которых мо-

гут быть больше значений токов удаленных КЗ. Для этого необходимо быстро идентифицировать вид тока возмущения. Является ли он током удаленного КЗ в конце защищаемой линии, или пусковым током ЭД соседнего фидера. В алгоритме срабатывания расцепителя АВ необходимо к существующей токовой уставке  $I_{sd}$  зоны КЗ, которая выбирается по величине тока прямого пуска ЭД, ввести дополнительную уставку  $I'_{sd}$ , меньшую  $I_{sd}$  и согласованную с ожидаемым током удаленного КЗ. Меньшая уставка должна быть заблокирована при пусках ЭД и активирована при удаленных КЗ.

Ударный ток КЗ в любой фазе будет наибольшим, если замыкание произойдет в момент, когда фазная электродвижущая сила (ЭДС) проходит через нуль. Для этого случая изменение фазного тока во времени  $t$  описывается уравнением:

$$i = I_m \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin(\varphi - \psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитудное значение периодической составляющей тока КЗ в фазе;  $\varphi = \text{arctg}(\omega L/R)$  – угол сдвига, на который периодическая составляющая фазного тока отстает от фазной ЭДС;  $L, R$  – индуктивность и активное сопротивление фазы;  $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\text{tg } \varphi}{\omega} = \frac{\sin \varphi}{\omega \cos \varphi}$  – постоянная времени электрической цепи;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота сети;  $f$  – рабочая частота сети;  $\psi$  – момент возникновения КЗ.

Характер изменения во времени тока в любой фазе электрической цепи существенно зависит от такого случайного фактора, как момент возникновения тока возмущения, характеризуемого углом  $\psi$ . Поэтому по мгновенным значениям тока  $i_{j(a,b,c)}$  в каждой фазе  $a, b, c$ , полученным от датчиков тока ДТ (рис. 1), анализировать характер переходного процесса возмущения электрической цепи невозможно. Воспользуемся силовой функцией электрической цепи  $S(t)$ , которая характеризует суммарные электродинамические силы в трехфазной системе токов и представляет собой зависимость от времени суммы квадратов мгновенных значений токов всех трех фаз [12]:

$$S(t) = \sum_{a,b,c} i_j^2 = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t), \quad (2)$$

где  $i_j$  – мгновенное (дискретное) значение тока;  $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$  – мгновенные значения токов в фазах  $a, b, c$  соответственно:

$$i_a(t) = I_m \left[ \sin\left(\omega t + \psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (3)$$

$$i_b(t) = I_m \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (4)$$

$$i_c(t) = I_m \left[ \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (5)$$

$\psi$  – начальный угол ЭДС в фазе  $b$  (момент возникновения тока возмущения).

После подстановки уравнений (3)-(5) в (2) и преобразования полученного выражения уравнение для силовой функции принимает следующий вид:

$$S(t) = 3I_{ph}^2 \left[ 1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right], \quad (6)$$

где  $I_{ph}$  – действующее значение периодической составляющей тока.

Из уравнения (6) следует, что характер изменения во времени функции  $S(t)$  в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи не зависит от угла  $\psi$ , но существенно зависит от коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

На рис. 3 представлено семейство кривых силовой функции построенных по уравнению (6) для случаев трехфазного возмущения электрической цепи с различным  $\cos \varphi$ , но одинаковым значением  $I_{ph}$ , равным 1.

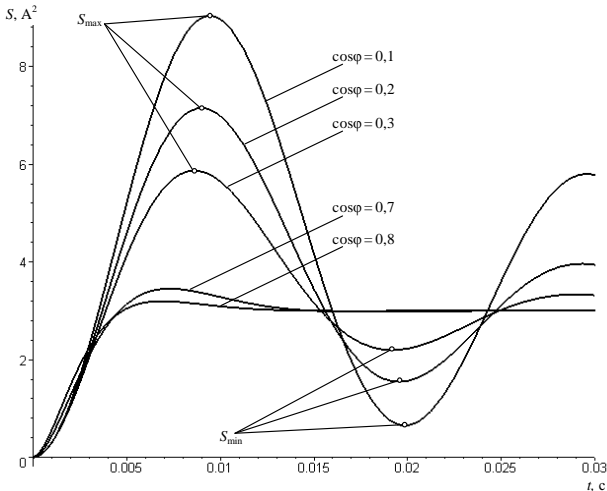


Рис. 3. Изменение силовой функции в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи.

Чем меньше  $\cos \varphi$  электрической цепи, тем большей величины достигает функция  $S(t)$  в первый период переходного режима. Таким образом, путем вычисления в реальном масштабе времени максимального  $S_{\max}$  и минимального  $S_{\min}$  значений силовой функции в первый период возникновения возмущения электрической цепи можно быстро определить  $\cos \varphi$  и идентифицировать вид тока возмущения. В [13] идентификация тока возмущения базируется именно на основе анализа функции  $S(t)$ .

Селективная защита обеспечивается за счет срабатывания АВ от интегральной уставки  $Q_{sd}$ . При этом расчет интегралов  $Q_{(a,b,c)}$  квадратов токов возмущения  $\Delta i_{j(a,b,c)}^2$  начинается после активации уставки  $I'_{sd}$ . Когда электрическая цепь находится под нагрузкой, током возмущения является не полное значение тока в фазе  $I_{ph}$ , а приращение тока  $\Delta I_{ph}$ , определяемое как разница между полным током  $I_{ph}$  в фазе, фиксируемым датчиками, и током предыстории  $I_{pr}$ , который протекал в электрической цепи (нагрузке) до возникновения тока возмущения:

$$\Delta I_{ph} = I_{ph} - I_{pr} \quad (7)$$

Расчет величины  $\Delta I_{ph}$  проводится с использованием функции  $S(t)$ , характер изменения которой, как уже отмечалось, не зависит от  $\psi$ , но существенно зависит от значения  $\cos \varphi$  и составляющей  $\Delta I_{ph}$ . Если под-

ставить в уравнение (2) мгновенные дискретные значения токов возмущения  $\Delta i_{j(a,b,c)}$ , достаточно быстро можно определить величину  $\Delta I_{ph}$ . Поэтому в состав комплексного критерия срабатывания защиты вводится именно значение тока возмущения  $\Delta I_{ph}$ , которое позволяет за счет возможности отстроиться от токов перегрузки, существенно повысить чувствительность защиты к удаленным КЗ, а быстрая идентификация вида тока возмущения электрической цепи (удаленное КЗ или пуск ЭД) позволяет увеличить быстрдействие защиты на более высоких ступенях.

Измерение мгновенных значений тока  $i_{j(a,b,c)}$  в каждой фазе электрической цепи и их аналого-цифровое преобразование осуществляется через равные промежутки времени  $\Delta t$ . Со сдвигом временного интервала на  $\Delta t$  осуществляют расчет мгновенных значений токов возмущения  $\Delta i_{j(a,b,c)}$ :

$$\Delta i_{j(a,b,c)} = i_{j(a,b,c)T_1} - i_{j(a,b,c)T_0}, \quad (8)$$

где  $i_{jT_1}$  – мгновенные значения тока в каждой фазе электрической цепи в течение текущего периода  $T_1$  изменения тока;  $i_{jT_0}$  – мгновенные значения тока в предыдущий период изменения тока  $T_0$  (ток предыстории).

Расчет интегралов  $Q_{(a,b,c)}$  квадратов мгновенных значений приращения тока в каждой фазе осуществляется по формуле:

$$Q_{(a,b,c)} = \int_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 dt = \sum_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t, \quad (9)$$

Значение  $Q_{(a,b,c)}$  сравнивается со значением интегральной уставки  $Q_{sd}$  расцепителя АВ. Момент времени, соответствующий  $Q_{(a,b,c)} = Q_{sd}$ , используют для формирования выдержки времени срабатывания интегральной селективной защиты  $t_Q$ . Расчет интегралов  $Q_{(a,b,c)}$  начинается в момент времени, когда мгновенное значение тока возмущения  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  в одной из фаз станет больше величины  $\sqrt{2}I'_{sd}$ , где  $I'_{sd}$  – значение токовой уставки, выбранной с учетом защиты от удаленных КЗ. Если ток возмущения трехфазный, то суммарный интеграл всех трех фаз за время периода изменения тока  $T$  равен:

$$Q_{\Sigma} = \sum_0^T Q_{(a,b,c)}. \quad (10)$$

Путем деления величины  $Q_{\Sigma}$  на максимальное значение  $S_{max}$  суммы квадратов мгновенных значений токов  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  (2) определяется время:



$$t_{sm} = Q_{\Sigma} / S_{\max} . \quad (11)$$

По величине  $t_{sm}$  определяют величину коэффициента мощности  $\cos \varphi$  электрической цепи. Время  $t_{sm}$  – это время, в течение которого эквивалентное термическое воздействие токов возмущения, сумма квадратов которых равна  $S_{\max}$ , равно фактическому термическому воздействию токов возмущения за время периода изменения тока. То есть это время эквивалентного термического воздействия на сеть максимальной суммы квадратов токов всех трех фаз, которая зависит от величины  $\cos \varphi$ .

Математически время  $t_{sm}$  определяется из уравнения:

$$\int_0^T S [\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] dt = \int_0^{t_{sm}} S_{\max} dt . \quad (12)$$

При  $\cos \varphi=0,3$ , характерном для запуска ЭД и  $\cos \varphi=0,7$ , характерном для удаленного КЗ, значения  $t_{sm}$  существенно отличаются друг от друга (12,2 и 16,4 мс соответственно), что свидетельствует о весомости времени  $t_{sm}$  для надежного определения величины  $\cos \varphi$  [13]. Таким образом, путем анализа функции  $S(t)$  в первый период возникновения тока возмущения можно быстро идентифицировать вид сверхтока и отстроиться от пусковых токов ЭД.

Зависимость коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от времени  $t_{sm}$  используется также для определения величины  $\Delta I_{ph}$  из выражения:

$$S_{\max} = 3 \Delta I_{ph}^2 \cdot K_y^2 . \quad (13)$$

где  $K_y$  – ударный коэффициент тока КЗ в электрической цепи, значение которого определяют по известной зависимости  $K_y = f(L/R)$  [14].

Откуда:

$$\Delta I_{ph} = \sqrt{\frac{S_{\max}}{3 \cdot K_y}} . \quad (14)$$

Необходимая отстройка от такого возможного фактора, как токи перегрузки в соседних фидерах, увеличивающие фазный ток защитного аппарата, осуществляется благодаря быстрому непрерывному мониторингу величины  $\Delta I_{ph}$ , когда значение  $\Delta I_{ph}$  в памяти микропроцессора обновляются каждый период  $T$  изменения тока. Ток нагрузки совокупности потребителей подключенных к защищаемой линии не может быть больше рабочего тока линии  $I_r$ . Значит ток возмущения электрической цепи, обусловленный подключением одного потребителя, также не может быть больше  $I_r$ . Поскольку вероятность одновременного подключения к линии нескольких потребителей в промежуток времени

$T = 20$  мс чрезвычайно мала [6], то предложенная защита в зоне токов КЗ не реагирует на токи перегрузки. То есть использование в качестве одного из критериев срабатывания защиты тока  $\Delta I_{ph}$  исключает отрицательное влияние на точность защиты заранее существующих токов нагрузки. Определение величины  $\cos\phi$ , а затем и значения  $\Delta I_{ph}$  основывается на анализе интегралов (9). Поэтому расчет интегралов  $Q_{(a,b,c)}$  осуществляют раньше определения величины  $\Delta I_{ph}$ , именно в момент времени, когда мгновенное значение тока  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  в одной из фаз становится больше величины  $\sqrt{2}I'_{sd}$ . Это позволяет обеспечить время срабатывания интегральной селективной защиты менее 20 мс, то есть повысить быстрдействие защиты по сравнению с [15].

Использование комплексного критерия срабатывания защиты, объединяющего несколько параметров, позволяет упростить алгоритм работы микропроцессорного расцепителя при реализации быстродействующей токовой защиты с высокой чувствительностью к токам удаленных КЗ, так как расчет интегралов (9) одновременно используется как для реализации интегральной селективной защиты, так и для защиты от удаленных КЗ. Таким образом, МПР автоматического выключателя формирует более совершенную времятоковую характеристику защиты, приведенную на рис. 4.

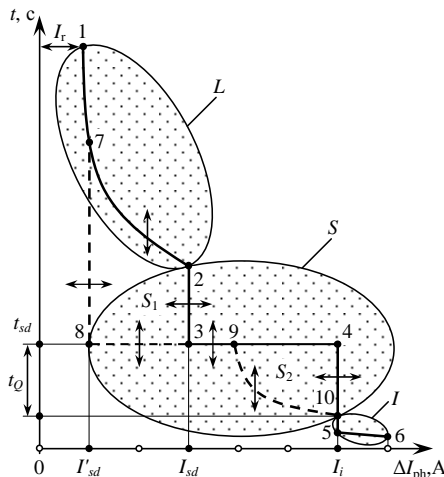


Рис. 4. Времятоковая защитная характеристика микропроцессорного расцепителя после модернизации:  $L$  – защита зоны перегрузки  $S$  – защита зоны КЗ;  $S_1$  – защита удаленного КЗ;  $S_2$  – интегральная селективная защита;  $I$  – защита "отсечки".

Участок 1-2 (рис. 4) формируется так же, как и в существующих защитах от токов перегрузки – время срабатывания  $t$  обратно зависит от величины полного тока в фазе. Переход от зоны перегрузки  $L$  в зону КЗ  $S$  в зависимости от вида тока возбуждения, может происходить либо по линии 2-3, если  $\Delta I_{ph} > I_{sd}$ , либо по ломаной 2-7-8 при удаленном КЗ или дальнем резервировании. Если ток возбуждения  $\Delta I_{ph}$  идентифицирован как пусковой ЭД, то токовая уставка защиты увеличивается от величины  $I'_{sd}$  до значения  $I_{sd}$ . Отрезок характеристики от тока, равного уставке удаленного КЗ  $\Delta I_{ph} = I'_{sd}$ , до тока, равного уставке "отсечки"  $\Delta I_{ph} = I_i$ , формируется временным и интегральным модулями. Оба модуля параллельно формируют время срабатывания селективной защиты по двум различным зависимостям. Время срабатывания, формируемое временным модулем  $t_{sd} = \text{const}$ , не зависит от тока, а время срабатывания  $t_Q$ , формируемое интегральным модулем, определяется величиной интеграла  $Q_{(a,b,c)}$ , то есть находится в обратной зависимости от квадрата величины  $\Delta I_{ph}$ . Благодаря параллельному формированию времен  $t_{sd}$  и  $t_Q$  при сравнительно небольших токах время срабатывания ограничивается фиксированной выдержкой времени  $t_{sd}$  (участки 8-4, или 9-4), а при больших значениях  $\Delta I_{ph}$  (участок 9-10), время срабатывания защиты уменьшается вследствие того, что интегральная уставка  $Q_{sd}$ , обеспечивающая селективность, учитывает особенности работы нижестоящего выключателя. В результате интеграл отключения электрической цепи вышестоящим выключателем по интегральной уставке  $Q_{sd}$  оказывается меньше интеграла отключения этой же электрической цепи нижестоящим выключателем с фиксированной выдержкой времени на отключение  $t_{sd}$ . То есть при наличии у выключателей уставки  $Q_{sd}$ , величина которой выбирается в два раза больше, чем интеграл отключения аппарата, стоящего ниже, время срабатывания селективной защиты получается значительно меньше. Уменьшение времени срабатывания селективной защиты характеризуется участком 4-10. В случае превышения током возбуждения  $\Delta I_{ph}$  значения  $I_i$  защита срабатывает мгновенно – участок 10-5-6. Таким образом, предложенная защита обеспечивает высокую чувствительность к токам удаленных КЗ и режим ДР.

Повышение быстродействия селективной защиты при токах КЗ достигается применением вместо ступенчато-временного метода, более быстродействующего, интегрального способа. При этом селективная работа выключателей разных ступеней обеспечивается не только путем соответствующего выбора временных задержек на отключение  $t_{sd}$ , а и различными значениями интеграла Джоуля ожидаемого тока

КЗ. Интегральный способ селективной защиты используют в предохранителях. Однако, использование предохранителей не позволяет обеспечить требуемую координацию по следующим причинам:

- зоны  $L$  и  $S$  защитной характеристики предохранителя взаимосвязаны, поэтому достичь минимального сдвига защитных характеристик в зоне КЗ двух последовательно включенных предохранителей не удается;

- значения интегралов плавления предохранителя нестабильны из-за конструктивных, технологических и эксплуатационных разбросов параметров предохранителей;

- на интеграл плавления вышестоящего предохранителя существенно влияют токи "предыстории", когда ток КЗ в одном из фидеров, который защищается нижестоящим предохранителем, может быть сравним с суммарным током нагрузки соседних фидеров.

Указанные недостатки при реализации интегральной селективной защиты могут быть устранены путем применения АВ с МПР. Для обеспечения высокого быстродействия интегральной защиты необходимо быстро отстроиться от апериодической составляющей тока КЗ, поскольку токовые уставки аппаратов защиты задаются действующим значением периодической составляющей тока. Действующее значение периодической составляющей тока КЗ обычно определяют относительно медленным методом интегрирования мгновенного значения тока за время не менее трех периодов (60 мс для рабочей частоты 50 Гц). Быстрое определение, в течение одного первого периода после возникновения КЗ (20 мс) указанного параметра возможно с помощью функции  $S(t)$ . Исходя из формулы (6), выражение для действующего значения периодической составляющей тока возмущения  $\Delta I_{ph}$  при симметричном трехфазном КЗ имеет вид:

$$\Delta I_{ph} = \frac{\sqrt{S(t)}}{3 \left[ 1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{T}} \right]}. \quad (15)$$

Применение уравнения (15) для определения действующего значения периодической составляющей тока и использования интеграла  $Q_{\Sigma}$  как дополнительного критерия формирования интегральной уставки  $Q_{sd}$  позволяет существенно повысить быстродействие защиты именно при граничных токах КЗ. Это связано с тем, что время срабатывания в данном случае обратно пропорционален квадрату тока, а ток, пропускаемый через выключатели высших ступеней защиты по

разным причинам всегда больше, чем ток через нижестоящие выключатели.

Действие интегральной селективной защиты показано на примере электроустановки (рис. 1). На рис. 5, а показаны последовательно включенные выключатели с дополнительными токовыми уставками  $I'_{sd}$ , на которых выполнена селективная защита одной ветви данной электроустановки. Линия 1 (рис. 5, б) соответствует карте ступенчато-временной селективности, а линия 2 соответствует интегральной селективной защите. Очевидно, что время срабатывания защиты при максимальном для электроустановки значении тока КЗ, равном 30 кА, при интегральной селективности можно снизить на время  $t_Q$  (рис. 4) с 0,4 с до 0,1 мс (рис. 5, б). При этом существенно снижаются термическая и электродинамическая нагрузки на элементы электроустановки при КЗ.

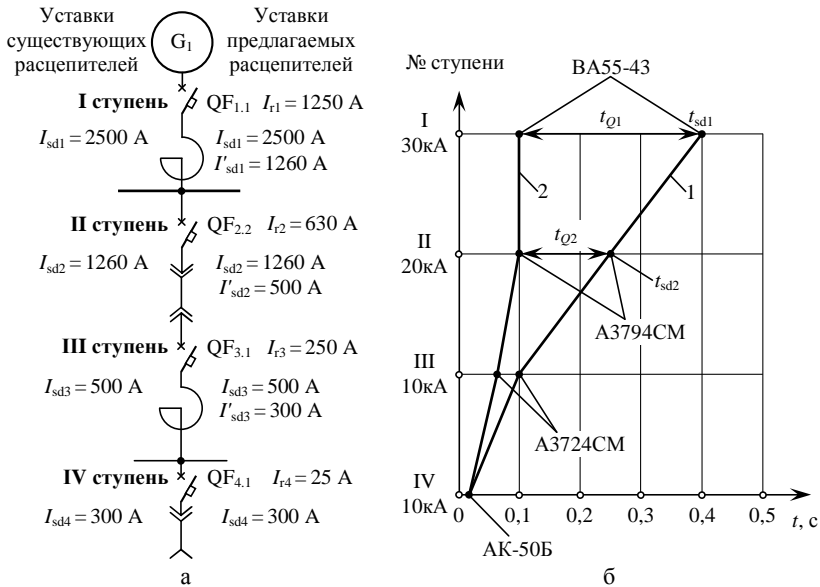


Рис. 5. Повышение быстродействия селективной защиты

Модернизацию существующих судовых электроустановок за счет реализации предложенных технических решений можно провести без каких-либо изменений структуры системы электроснабжения, что существенно снижает временные и финансовые затраты такой модерни-

зации. Замена подлежат только аналоговые полупроводниковые расцепители селективных выключателей I-III ступеней защиты на микропроцессорные блоки с интегральной уставкой  $Q_{sd}$ .

### **Выводы.**

1. Улучшение защитных свойств противоаварийной автоматики судовых систем электроснабжения достигается путем дальнего резервирования отказов аппаратов релейной защиты.

2. Времятоковые защитные характеристики существующих автоматических выключателей в зоне токов КЗ формируют некорректную с технической точки зрения карту селективной защиты судовых электроустановок, когда на более высоких степенях защиты наряду с увеличением ожидаемого тока КЗ увеличивается и время срабатывания защиты.

3. Повышение чувствительности к токам удаленного КЗ обеспечивается за счет надежной идентификации тока возмущения путем использования комплексного критерия срабатывания защиты, объединяющего величину  $\cos\phi$  и значение тока возмущения электрической цепи  $\Delta I_{ph}$ .

4. Более совершенная, с элементами адаптивности, времятоковая защитная характеристика микропроцессорного расцепителя автоматического выключателя позволяет существенно улучшить качество релейной защиты судовых систем электроснабжения путем удаленного резервирования отказов защит и существенно повысить уровень пожарной безопасности.

**Список литературы:** 1. Chowdhury, B.H., Barava S. (2006), "Creating Cascading Failure Scenarios in Interconnected Power Systems", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 18-22 June 2006, Montreal, Canada. ISBN 1-4244-0493-2. 2. Кобозев А.С. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ / А.С. Кобозев, А.Г. Середя, Л.Б. Жорняк, В.В. Морзун // *Электротехника та електроенергетика*. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – № 2. – С. 66-72. ISSN 1607-6761. 3. Tan, J. C., Crossley, P.A., D. Kirschen, Goody, J. and Downes, J.A. (2000), "An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, iss. 2, pp. 508-514. ISSN 0885-8977. 4. Garlapati, S., Hua Lin, Sambamoorthy, S., Shukla, S.K., Thorp, J.S. (2010), "Agent Based Supervision of Zone 3 Relays to Prevent Hidden Failure Based Tripping", *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 4-6 October 2010, PP. 256-261. ISBN 978-1-4244-6510-1. 5. Chang, C.S., Feng, T., Khambadkone, A.M., Kumar, S. (2000), "Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform", *Electric Power Applications IEE Proceedings*, Vol. 147, iss. 6, pp. 520-526. ISSN 1350-2352. 6. Венцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения:

учеб. пособие / *Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров*. – 5-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-406-00565-1. **7. Баранов А.П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Учебник для вузов. / 2-е издание, переработанное и дополненное. – СПб: Судостроение, 2005. – 528 с. – ISBN 5-7355-0680-3. **8. Богомолов В.С.** Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация [Текст]: учеб. для студ. и курсантов, обуч. в сред. проф. учеб. заведениях системы рыбохозяйств. комплекса по спец. "Эксплуатация транспорт. электрооборудования и автоматики", "Эксплуатация транспорт. энергет. установок" / *В.С. Богомолов*. – М.: Мир, 2006. – 320 с. – ISBN 5-03-003767-5. **9.** ТУ 16-522.136-78. Выключатели автоматические серии АК50Б. Технические условия. Утв. ВПО "Союзэлектроаппарат". Гр. Е71. ДК 29.120.40. Режим доступа: <http://www.etm.ru/files/ak50b.pdf>. Дата звернення 03.11.2013. **10.** Выключатели автоматические типа ВА53-43 и ВА55-43. Руководство по эксплуатации ГЖИК.641353.014РЭ. Курск: КЭАЗ, 2010. – 33 с. **11.** Руководство по устройству электроустановок. Технические решения "Шнейдер Электрик" / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с. **12. Райнин В.Е.** Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения / *В.Е. Райнин, А.С. Кобозев* // Электротехника. – № 2. – 2009. – С. 44-51. **13.** Пат. 101084 України МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань / *О.С. Кобозев, О.Г. Серета*. – № а201109057; заявл. 19.07.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. №4. – 6 с. **14.** ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. **15.** Пат. 73195 України МПК Н 02 Н 3/08 Спосіб максимального струмового захисту електроустановок / *Г.М. Гапоненко, Ю.М. Агафонов, С.Г. Рассомахін, В.М. Шлюкін*. – №2003010807. Заявлено 30.01.2003; Опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. – 6 с.

*Поступила в редколлегию 20.12.2013*

#### **УДК 621.316.925.1: 621.316.578.1**

**Повышение уровня пожарной безопасности корабельных систем электроснабжения / Серета А.Г., Варшамова И.С., Литвиненко В.В.** // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 37-52. Бібліогр.: 15 назв.

Обґрунтована актуальність підвищення чутливості апаратів релейного захисту до струмів віддалених коротких замикань при реалізації віддаленого резервування відмов захистів. Показано, як цифрова обробка сигналів від датчиків струму дозволяє розширити можливості захистів, що реалізуються в розчіплювачах автоматичних вимикачів. Підтверджено ефективність отримання додаткової інформації про процеси в електричному колі за ступенем спотворення фазних струмів в перехідному режимі. Доведена можливість іденти-

фікації виду різкого зростання струму в перехідному режимі виникнення збурення електричного кола. Запропоновано критерій блокування спрацювання автоматичних вимикачів при прямому пуску асинхронних електродвигунів. Надано науково-технічне обґрунтування застосування комплексного критерію ідентифікації пускового струму асинхронного електродвигуна. Наведено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту при блокуванні спрацювання автоматичних вимикачів для забезпечення гарантованого пуску і розгону асинхронного електродвигуна.

**Ключові слова:** віддалене резервування, мікропроцесорний розчіплювач, релейний захист

The relay protection devices sensitivity increasing topicality for remote short-circuit currents in the failure protection remote backup implementation is grounded. How the digital processing of signals from the current sensors allows to empower of circuit breakers trip units protective ability is shown. Effectiveness to extract more information about the processes in the electrical circuit according to the distortion degree of phase currents during the transitional mode is confirmed. The fast increase current type identification possibility in a transient mode of disturbance electrical circuits proved. The circuit breakers operation blocking criterion for induction motors direct start is proposed. Scientific and technical justification for the complex criterion application of induction motor starting current identification is given. The algorithm of the microprocessor protection devices operation while circuit breakers blocking operation to the guaranteed start-up and acceleration induction motor ensure is given.

**Keywords:** remote backup, microprocessor trip, relay protection.