

УДК 621.316.13: 621.316.95

**РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АППАРАТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА**

**А. Г. Серeda**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: lexis\_suba@mail.ru

Доказана актуальность повышения чувствительности аппаратов защиты к токам удаленных коротких замыканий при реализации дальнего резервирования отказов защит. Обоснована возможность расширения перечня реализуемых защит в расцепителях автоматических выключателей на основе результатов цифровой обработки сигналов от датчиков тока. Подтверждена эффективность извлечения дополнительной информации о процессах в электрической цепи по степени искажения действующих значений фазных токов в переходном режиме. Проанализирована возможность быстрой идентификации вида броска тока в переходном режиме возникновения возмущения электрической цепи. Приведены примеры идентификации вида тока возмущения электрической цепи. Предложен критерий блокировки срабатывания автоматических выключателей при прямом пуске асинхронных электродвигателей.

**Ключевые слова:** микропроцессорное устройство, релейная защита, частота дискретизации, гармоника, действующий ток.

**РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ АПАРАТІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДІЮЧОГО ЗНАЧЕННЯ СТРУМУ**

**О. Г. Серeda**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: lexis\_suba@mail.ru

Доведено актуальність підвищення чутливості апаратів захисту до струмів віддалених коротких замикань при реалізації далекого резервування відмов захистів. Обґрунтовано можливість розширення переліку реалізованих захистів у розчіплювачах автоматичних вимикачів на основі результатів цифрової обробки сигналів від датчиків струму. Підтверджено ефективність отримання додаткової інформації про процеси в електричному колі за ступенем спотворення діючих значень фазних струмів у переходному режимі. Проаналізовано можливість швидкої ідентифікації виду швидкого зростання струму в переходному режимі виникнення обурення електричного кола. Наведені приклади ідентифікації виду струму збурення електричного кола. Запропоновано критерій блокування спрацьовування автоматичних вимикачів при прямому пуску асинхронних електродвигунів.

**Ключові слова:** мікропроцесорний пристрій, релейний захист, частота дискретизації, гармоніка, діючий струм.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В современных автоматических выключателях (АВ) используются микропроцессорные расцепители, позволяющие существенно расширить информационно-измерительные и коммуникационные функции. В то же время возможности цифровых технологий для анализа процессов в защищаемых сетях с целью идентификации аварийных ситуаций (короткое замыкание (КЗ) в месте установки аппарата, удалённое КЗ, обрыв нейтрали) и соответствующей реакции защиты используются недостаточно. Даже при защите электрических сетей выключателями передовых фирм, таких как АВВ, Schneider Electric, Siemens, применяются внешние устройства, реагирующие на те аварийные ситуации, на которые не могут реагировать выключатели [1–5]. Например, терминалы БМРЗ–0,4 [6, 7] способны по соотношению приращений активной и реактивной составляющих тока прямой последовательности обеспечить защиту от удалённых КЗ и дальнейшее резервирование отказов защит.

Кроме проблем, связанных с обеспечением дальнего резервирования, существует ряд задач, которые приходится решать, привлекая для анализа аварий-

ных ситуаций среднееквадратичное значение фазного тока  $I_{ph}$  и другие параметры защищаемой цепи. Так, при реализации мгновенной защиты «отсечки» для быстрого её срабатывания в качестве критерия используют мгновенные значения тока  $i_j$  в момент возникновения тока возмущения. Однако параметр  $i_j$  не может обеспечить надёжную селективность работы выключателей [8, 9].

Отдельно отметим проблему нелинейных искажений синусоиды фазных токов и, как следствие, появление высших гармоник тока, без учёта которых невозможно построить полноценную защиту при однофазных КЗ на нейтральный проводник, при токовых перегрузках электродвигателей (ЭД) и других элементов электрической сети, а также при обрыве нейтрального проводника (N-проводника). Существующие методы анализа гармонического спектра фазных токов оказались избыточными для применения в устройствах релейной защиты, т.к. математический аппарат указанных методов существенно отличается от математического аппарата, традиционно используемого в расцепителях АВ [10].

Целью данной работы является анализ существ-

вующих проблем в организации релейной защиты электрических сетей и способы их решения на основе оценки действующих значений тока, вычисленных различными методами для определения необходимых параметров при идентификации вида тока возмущения электрической цепи.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Для иллюстрации проблем в организации релейной защиты электрических сетей и наглядности изложения путей их решения на рис. 1 приведена типовая схема для сетей электроснабжения 0,4 кВ с длинной линией и распределёнными вдоль длины различными видами нагрузок. В главном распределительном щите (ГРЩ) на низкой стороне трансформатора трансформаторной подстанции (ТП) установлен вводной выключатель  $QA_{1,1}$ , питающий магистральный токопровод, к которому подключены фидерные выключатели, один из которых,  $QF_{1,1}$ , защищает длинную линию с распределённой нагрузкой.

**Мгновенная токовая защита «отсечка».** Одной из проблем является надёжность и быстрота срабатывания «отсечки» (защиты  $I$ ) при КЗ в местах установки выключателей  $QA_{1,1}$  и  $QF_{1,1}$ .

Если КЗ произошло в месте установки выключателя, отключение цепи этим выключателем должно произойти мгновенно, без выдержки времени. Для обеспечения же селективности при КЗ на выводах

$QF_{1,1}$  отключение  $QA_{1,1}$  должно произойти с выдержкой времени, заданной временной уставкой  $t_{sd1}$ . Так как расстояние между выключателями  $QA_{1,1}$  и  $QF_{1,1}$  обычно достаточно мало, различие в величине тока КЗ будет незначительным. Поэтому для реализации защиты  $I$  необходимо величину действующего значения фазного тока цепи  $I_{ph}$  определять не только быстро, но и достаточно точно. Вычислить значение  $I_{ph}$  точно и быстро, в течение 5–10 мс, традиционным способом интегрирования квадратов дискретных значений тока  $i_j^2$  невозможно из-за наличия аperiodической составляющей в первый период после возникновения тока возмущения. Поэтому используются другие параметры, формирующие критерий срабатывания защиты: мгновенные или дискретные значения тока  $i_j$  и скорость роста тока  $di/dt$  в начальный промежуток времени после возникновения тока возмущения. Если известен  $\cos\varphi$ , а значит величина электромагнитной постоянной электрической цепи  $\tau$ , то по значению  $i_j$  можно оценить величину  $I_{ph}$ . Но при этом трудно обеспечить достаточную точность, необходимую для надёжной селективной работы близко расположенных выключателей. Обусловлено это влиянием на значения  $i_j$  такого случайного фактора, как фаза  $\psi$  возникновения тока возмущения.

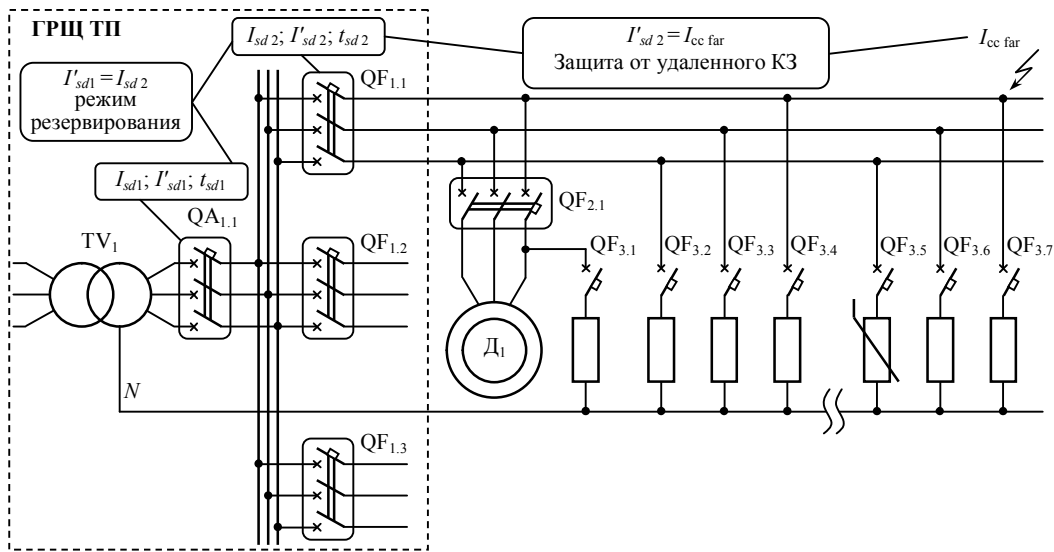


Рисунок 1 – Схема электрической сети 0,4 кВ

На рис. 2,а приведены зависимости мгновенных значений фазных токов во времени  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  для случаев КЗ за выключателем  $QA_{1,1}$  и за выключателем  $QF_{1,1}$  (рис. 1), построенные для двух значений фазы  $\psi = 0$  и  $\psi = \varphi$  возникновения тока возмущения. Принятые значения  $\psi$  определяют диапазон, в котором могут изменяться мгновенные значения фазных токов. Для удобства сравнения действующие значения токов приняты равными  $I_{ph1} = 1$  и  $I_{ph2} = 0,8$ , соответственно, а значения  $\cos\varphi$  одинаковыми и равными  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = 0,2$ .

Как следует из зависимостей (рис. 2,а), иденти-

фицировать место КЗ за выключателем  $QA_{1,1}$  или  $QF_{1,1}$  из анализа мгновенных значений тока можно только в небольшой зоне, ограниченной промежутком времени 2–5 мс после возникновения аварии, где мгновенные значения токов в зависимости от места КЗ действительно значительно отличаются. Более надёжным критерием быстрой идентификации места КЗ является значение  $I_{ph}$ , метод определения которого основан на жесткой взаимосвязи величины  $I_{ph}$ , суммы квадратов мгновенных значений токов трёх фаз  $\sum_{a,b,c} i_j^2$  и постоянной времени  $\tau$ . Ука-

занные параметры объединяет силовая функция электрической цепи  $S(t)$ , которая, согласно [11], представляет собой зависимость от времени суммы квадратов мгновенных значений токов всех трех фаз:

$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t) = \sum_{a,b,c} i_j^2 = 3I_{ph}^2 \left[ 1 - 2\hat{a} \frac{t}{\tau} \cos(\omega t) + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]. \quad (1)$$

Если перейти к дискретным значениям времени  $t_j$  и тока  $i_j$ , а выражение в квадратных скобках (1) обозначить как коэффициент  $k_\tau$ , зависящий от постоянной времени  $\tau$ , то при фиксированном  $t_j$  получим

$$I_{ph} = \sqrt{\frac{\sum_{a,b,c} i_j^2}{3k_\tau}}. \quad (2)$$

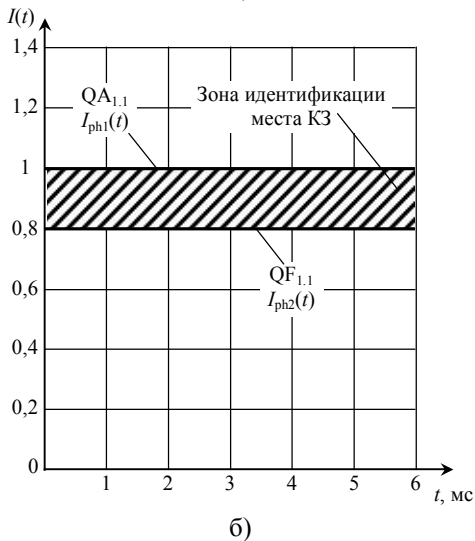
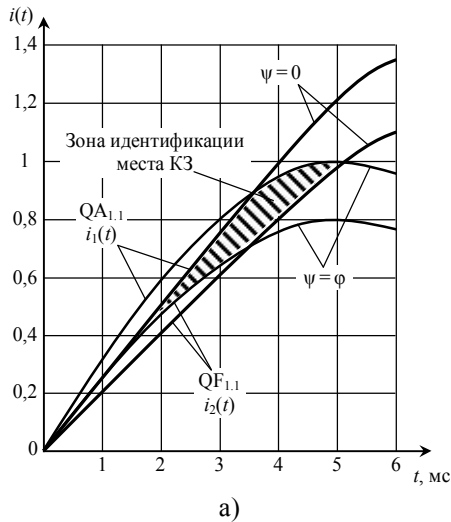


Рисунок 2 – Идентификация места короткого замыкания

Выражение (2) показывает, что в любой фиксированный момент времени  $t_j$ , если определить сумму

$\sum_{a,b,c} i_j^2$  и подставить в выражение (2) соответствующее значение коэффициента  $k_\tau$ , можно достаточно просто найти действующее значение тока в цепи  $I_{ph}$ .

При этом значения  $k_\tau$  заносятся в память микропроцессорного устройства защиты в виде таблицы. Например, для времени  $t_j = 4$  мс значение  $k_\tau = 1,12$  при  $\cos\phi = 0,2$  и  $k_\tau = 1,04$  при  $\cos\phi = 0,3$ .

По аналогии с зависимостями  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  (рис. 2,а) на рис. 2,б приведены зависимости от времени действующих значений тока  $I_{ph1}(t)$  и  $I_{ph2}(t)$ , вычисленных по выражению (2) при КЗ в месте установки выключателей QA<sub>1.1</sub> или QF<sub>1.1</sub>. Очевидно, что зона надёжной идентификации места КЗ, при использовании в качестве критерия значений  $I_{ph}$ , не ограничивается временными рамками. Фактически в любой промежуток времени можно по величине  $I_{ph}$  идентифицировать место КЗ и выработать соответствующий алгоритм срабатывания защиты.

*Дальнее резервирование.* На схеме электрической сети (рис. 1) удалённое КЗ на линии показано в месте присоединения выключателя QF<sub>3.7</sub>. Фидерный выключатель QF<sub>1.1</sub> должен быть чувствителен к току КЗ в конце линии (в месте установки QF<sub>3.7</sub>), и в то же время не реагировать на пусковой ток  $I_{st}$  электродвигателя Д<sub>1</sub>, значение которого может быть больше тока  $I_{cc\ far}$  удалённого КЗ. Очевидно, что одного параметра  $I_{ph}$  недостаточно для идентификации пускового тока и блокировки срабатывания защиты. Поэтому, как уже упоминалось, в терминалах БМЗ-0,4 для идентификации пусковых токов, кроме величины действующего значения тока приращенция (возмущения) цепи  $\Delta I_{ph}$ , определяются еще значения активной и реактивной составляющих тока прямой последовательности.

Покажем, что для идентификации пусковых токов достаточно анализа только действующих значений симметричной составляющей тока возмущения цепи  $\Delta I_{ph}$ . Если возмущение электрической цепи вызвано резким увеличением тока нагрузки (пуск ЭД или КЗ), то для корректного определения величины  $\Delta I_{ph}$  методом интегрирования квадратов дискретных значений тока  $i_j^2$  необходимо отсутствие апериодической составляющей в кривой тока. Выполнить это условие можно или путем задержки расчета значения  $\Delta I_{ph}$  на 1–2 периода  $T$  изменения тока, или существенно расширив временной интервал, в течение которого производится интегрирование (3–4 периода  $T$ ). Если же расчет значения  $\Delta I_{ph}$  производить в первый период  $T_1$  изменения тока возмущения, то будут иметь место искажения, обусловленные влиянием переходного процесса изменения тока. При этом степень искажения величины  $\Delta I_{ph}$  будет зависеть от характера переходного процесса, т.е. от величины постоянной времени  $\tau$ . Поэтому возможно из анализа величины искажения  $\Delta I_{ph}$ , возникающего при расчете её в период  $T_1$ , определить значение  $\tau$  или  $\cos\phi$ . Чтобы реализовать эту возможность, необходим такой метод анализа, который бы давал однозначный результат при раз-

ных начальных фазах  $\psi$  возникновения тока возмущения. Анализ степени искажения величины  $\Delta I_{ph}$  отдельно в каждой фазе не отвечает требованию однозначности результата расчета. Массив дискретных значений  $i_j$  и рассчитанных по ним значений  $\Delta I_{ph}$  будет зависеть от  $\psi$ . Если же анализ степени искажения величины  $\Delta I_{ph}$  в период  $T_1$  после возникновения тока возмущения производить по сумме квадратов действующих значений токов всех трех фаз  $\sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1}^2$ , то результат будет однозначно определяться только величиной  $\tau$  или  $\cos\phi$ .

Докажем такую особенность суммы  $\sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1}^2$ .

Сумма действующих значений токов возмущения всех трех фаз в первый  $T_1$  период после возникновения возмущения может быть выражена как

$$\sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} \Delta i_a^2(t) dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} \Delta i_b^2(t) dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} \Delta i_c^2(t) dt}, \quad (3)$$

где  $\Delta i_a(t)$ ,  $\Delta i_b(t)$ ,  $\Delta i_c(t)$  – мгновенные значения токов возмущения в каждой из фаз  $a, b, c$ .

Сопоставив выражение (3) с выражением (1) для силовой функции цепи, можно записать:

$$\sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} S(t) dt. \quad (4)$$

Характер изменения функции  $S(t)$  не зависит от  $\psi$ . Следовательно, и её интеграл, и левая часть выражения (4) также не зависят от  $\psi$ . А, как следует из (1), интеграл функции  $S(t)$ , а, следовательно, и сумма  $\sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1}^2$  зависят от постоянной времени  $\tau$  или

$\cos\phi$ . На рис. 3 приведены зависимости функции  $S(t)$  от времени для двух значений коэффициента мощности:  $\cos\phi = 0,3$  и  $\cos\phi = 0,7$ . Как видно, площадь, ограниченная кривой функции  $S(t)$  при  $\cos\phi = 0,3$ , заметно больше аналогичной площади при  $\cos\phi = 0,7$ .

При  $\cos\phi = 0,3$  интеграл  $\int_0^{T_1} S_{0,3}(t) dt$  почти на 20 %

больше, чем аналогичный интеграл за второй период  $T_2$ , в то время как при  $\cos\phi = 0,7$  интеграл функции  $S(t)$  за период  $T_1$  примерно на 10 % меньше, чем за период  $T_2$ . При  $\cos\phi = 0,5$  интегралы функции  $S(t)$  за периоды  $T_1$  и  $T_2$  получаются примерно одинаковыми. Таким образом, сравнение сумм  $\sum_{a,b,c} \Delta I_{ph}^2$ ,

рассчитанных по дискретным значениям фазных токов первого  $i_{jT_1}$  и второго  $i_{jT_2}$  периода, позволяет идентифицировать вид тока возмущения цепи. Если величину  $\Delta I_{phT_2}$ , рассчитанную по значениям  $i_{jT_2}$ , считать истинным действующим значением  $\Delta I_{ph}$  симметричной составляющей тока, то по степени искажения этой величины за счет наличия в первый

период  $T_1$  аperiodической составляющей можно идентифицировать вид тока возмущения.

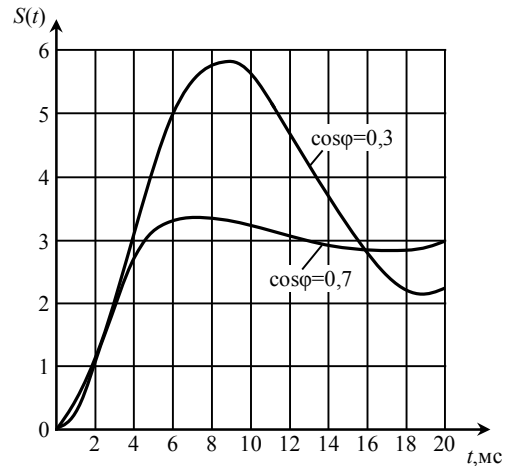


Рисунок 3 – Зависимость силовой функции от времени

Например, если выполняется условие

$$\begin{cases} 0,9 \sum_{a,b,c} \Delta I_{phT_1}^2 - 3 \Delta I_{phT_2}^2 \geq 0; \\ \Delta I_{phT_2}^2 \leq I_{st}^2, \end{cases} \quad (5)$$

ток возмущения цепи можно идентифицировать как пусковой ток ЭД.

*Защиты, требующие гармонического анализа спектра фазных токов.* В схеме электрической сети (рис. 1) к фидеру за выключателем QF<sub>1.1</sub> подключены как линейные однофазные нагрузки, так и нелинейные (компьютерное и офисное оборудование), искажающие синусоидальный характер изменения фазных токов  $i_{ph}(t)$ . Возникающие при этом высшие гармоники тока создают проблемы при построении защиты от обрыва нейтрального проводника ( $N$ -проводника) в любом месте длинной линии электропередачи. Например, в месте установки выключателя QF<sub>3.5</sub>. Критерием срабатывания защиты является несоответствие текущего «образа» электрической цепи со «штатным», соответствующим отсутствию обрыва  $N$ -проводника. «Штатным» образом цепи является определенная совокупность значений фазных токов  $I_{ph(a,b,c)}$  и соответствующая им величина ожидаемого тока  $I'_N$  в  $N$ -проводнике. При отсутствии высших гармоник величина  $I'_N$  равна модулю геометрической суммы векторов фазных токов, сдвинутых на  $120^\circ$ :

$$I'_N = \left| \vec{I}_{pha} + \vec{I}_{phb} + \vec{I}_{phc} \right|. \quad (6)$$

При появлении высших гармоник тока величина  $I'_N$  будет определяться геометрической суммой векторов гармоник, не кратных трем, и арифметической суммой третьей  $I'_3$  и кратных ей гармоник тока:

$$I'_N = \sqrt{\left( \sum_{a,b,c} \vec{I}'_1 \right)^2 + \left( \sum_{a,b,c} I'_3 \right)^2 + \left( \sum_{a,b,c} \vec{I}'_5 \right)^2}, \quad (7)$$

где  $I'_1, I'_5$  – ожидаемый ток первой и пятой гармоник.

Поэтому без определения гармонического спектра фазных токов защищаемой цепи строить защиту от обрыва  $N$ -проводника некорректно.

Кроме того, наличие высших гармоник тока приводит к дополнительным потерям в обмотках и сердечниках ЭД [12]. Так как в цепях электродвигателей нет третьей гармоники тока, а в фазных токах в большинстве случаев наиболее значимыми по величине являются первая, третья и пятая гармоники, то наиболее опасной для электродвигателей остается пятая гармоника. Поэтому без учета влияния высших гармоник на токовые перегрузки ЭД невозможно обеспечить и оптимальную характеристику его защиты.

Следует также отметить, что при наличии высших гармоник тока, если не принять соответствующих мер, возможны погрешности в определении величины  $I_{ph}$  микропроцессорными устройствами. Чтобы корректно вычислить действующее значение несинусоидального тока, соответствующим образом должен быть выбран интервал дискретизации  $\Delta t_d$  или частота дискретизации  $f_d$  исходной аналоговой зависимости  $i_{ph}(t)$ . Согласно [13], частота дискретизации должна быть больше удвоенной частоты  $f_k$  наибольшей  $k$ -й гармоники. Если более значимыми являются первая, третья и пятая гармоники, то  $f_d$  должна быть:  $f_d > 2, f_5 > 500$  Гц. Кроме того, согласно [14], частота дискретизации должна быть не менее трехкратной по отношению к частоте  $f_k$ . При невыполнении указанных требований рассчитанное значение  $I_{ph}$  претерпит искажения, обусловленные влиянием высших гармоник. При этом степень искажений истинного значения  $I_{ph}$  будет зависеть от спектра гармоник и их величины. Таким образом, как и в случае дальнего резервирования, когда на степень искажения  $I_{ph}$  влияло появление апериодической составляющей тока, появление в фазном токе высших гармоник также приводит к искажению  $I_{ph}$ . Поэтому закономерен вопрос: возможно ли использовать искажения  $I_{ph}$  для определения фактора, приводящего к этим искажениям? Покажем, что для конкретных случаев, имеющих место в реальных электрических сетях 0,4 кВ, параметр  $I_{ph}$  позволяет определить гармонический спектр фазных токов.

Теория и различные методы гармонического анализа спектра периодического сигнала достаточно хорошо проработаны и используются в различных областях науки и техники. Кроме классических методов решения прикладных задач с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) разработаны альтернативные методы, например, алгоритм Герцеля [15] и его модифицированный вариант [16]. Однако эти методы используют математический аппарат, существенно отличающийся от традиционно применяемого в устройствах релейной защиты. Прежде всего, это использование параметра  $I_{ph}$  как критерия срабатывания. Поэтому для построения сложных защит, в которых кроме значения  $I_{ph}$  необходимо определять величины его наиболее значимых гармоник, представляется целесообразным использовать аналогичный математический аппарат

интегрирования квадратов дискретных значений  $i_j^2$ .

Возможность простого определения нижнего спектра гармоник фазных токов обусловлена тем, что нелинейные нагрузки, которые приводят к искажениям фазных токов, формируют кривую фазного тока  $i_{ph}(t)$ , которая, с определенным допущением, описывается функцией, симметричной относительно начала координат. В [17–19] показаны зависимости  $i_{ph} = f(t)$  и их гармонический спектр для разных типов нелинейных нагрузок. Формы представленных кривых близки к функциям, симметричным относительно начала координат, а наиболее значимыми по величине являются первые три нечетные гармоники тока (первая, третья и пятая). Поэтому с допущениями, не критичными для построения сетевых защит, можно принять, что все нечетные гармоники во всех фазах имеют одинаковую нулевую начальную фазу. Следовательно, вектор тока пятой гармоники должен вращаться в противоположном направлении по отношению к вращению вектора тока основной, первой, гармоники. То есть начальные фазы векторов токов первой и пятой гармоники смещены друг относительно друга на угол  $180^\circ$ . При таких начальных условиях техническая суть определения амплитуд первых трех нечетных гармоник фазного тока следующая.

Одновременно производится непрерывный мониторинг тока  $I_{ph}$  при частоте дискретизации в три раза большей частоты  $f_5$  ( $f_d > 3, f_5 > 750$  Гц), а также действующих значений  $I'_{ph}$  и  $I''_{ph}$  при частотах дискретизации в два раза больших частот третьей ( $f'_d = 300$  Гц) и пятой ( $f''_d = 500$  Гц) гармоник, соответственно. При скользящем с заданным шагом  $\Delta t_{ск}$  мониторинге значений  $I_{ph}, I'_{ph}$  и  $I''_{ph}$  рассчитываются временные зависимости  $I_{ph} = f(t), I'_{ph} = f(t)$  и  $I''_{ph} = f(t)$ . При  $f_d = 750$  Гц требование точного определения значения  $I_{ph}$  выполняется с учетом всех значимых гармоник. Поэтому рассчитанные значения  $I_{ph}$ , независимо от начального момента вычислений, всегда будут истинными и постоянными, а зависимость  $I_{ph}(t)$ , как показано на рис. 4, представляет собой прямую линию, параллельную оси времени.

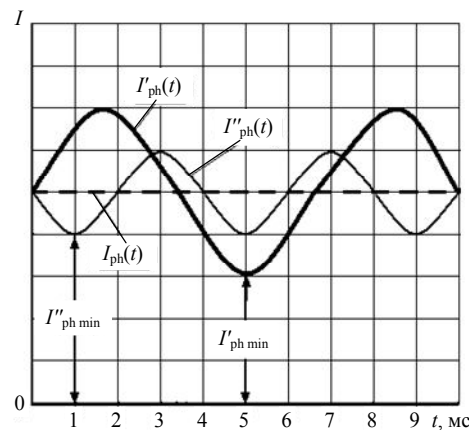


Рисунок 4 – Результаты расчета действующих значений фазного тока при различных частотах дискретизации

При расчете зависимости  $I''_{ph} = f(t)$  с частотой дискретизации  $f'_d = 500$  Гц выполняется требование точного определения действующих значений токов только первой и третьей гармоник. Величина  $I_5$  тока пятой гармоники не может быть без искажений учтена в суммарном фазном токе  $I''_{ph}$ . Доля  $I_5$  в токе  $I''_{ph}$  будет зависеть от начального момента вычислений. В момент времени, соответствующий прохождению фазного тока  $i_{ph}(t)$  и, соответственно, пятой гармоники через нуль, во всех дискретных значениях  $i_j$  не будет составляющей  $I_5$ . Значит, в эти моменты времени будет достигаться минимальное значение  $I''_{phmin}$  зависимости  $I''_{ph}(t)$  (рис. 4). Так как в минимальном значении действующей величины  $I''_{phmin}$  ток пятой гармоники отсутствует, а в значении  $I_{ph}$  учтены все три гармоники тока, определение величины  $I_5$  не представляет трудностей.

При частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц в зависимости  $I'_{ph}(t)$  в моменты времени, соответствующие прохождению фазного тока через нуль, во всех дискретных значениях фазного тока не будет составляющей тока  $I_3$  третьей гармоники. В эти моменты времени будут достигаться минимальные значения  $I'_{phmin}$  зависимости  $I'_{ph}(t)$  (рис. 4). Требование точного определения действующего значения в этом случае соблюдается только для тока первой гармоники. При этом величина  $I'_{phmin}$  будет включать в себя как действующий ток первой гармоники  $I_1$ , так и действующий ток пятой гармоники  $I_{5(300)}$ , рассчитанный при частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц. При этом значение  $I_{5(300)}$ , вычисленное по значениям  $i_{j(300)}$ , соответствующим частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц, оказалось равным истинному действующему значению  $I_5$ , вычисленному по  $i_{j(750)}$  с частотой дискретизации  $f_d = 750$  Гц. Восстановленная по значениям  $i_{j(300)}$  зависимость тока пятой гармоники от времени трансформируется в зависимость  $i_{5(300)}(t)$  с частотой первой гармоники. На рис. 5 показаны дискретные значения тока пятой гармоники, соответствующие частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц, а также восстановленный по этим дискретным значениям полупериод изменения тока  $i_{5(300)}(t)$ . Как видно из графиков, зависимость  $i_{5(300)}(t)$  имеет частоту и начальный фазовый сдвиг такие же, как и у основной, первой, гармоники тока  $i_1(t)$ . При этом начальная фаза тока пятой гармоники  $i_5(t)$  по отношению к току  $i_1(t)$ , как было указано ранее, сдвинута на угол  $180^\circ$  (находятся в противофазе).

Так как в данном случае общий фазный ток  $I'_{phmin}$  состоит из двух одинаковых по частоте и фазе гармоник, то можно записать следующее простое равенство  $I'_{phmin} = I_1 + I_5$ , из которого легко определить значение тока первой гармоники.

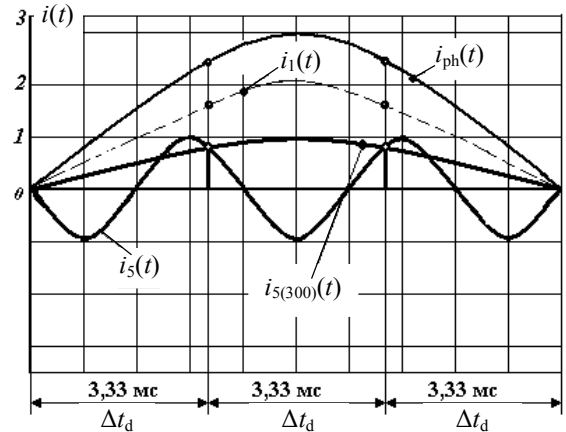


Рисунок 5 – Результаты расчета временных зависимостей гармоник фазного тока при частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц

Таким образом, на основании анализа действующих значений тока, рассчитанных при непрерывном мониторинге для трёх разных частот дискретизации, получаем следующую информацию о параметрах защищаемой электрической цепи:

- при частоте дискретизации  $f_d = 750$  Гц определяем истинное действующее значение фазного тока  $I_{ph}$ ;

- при частоте дискретизации  $f'_d = 500$  Гц определяем действующие значения  $I''_{ph}$ , в которых отсутствует пятая гармоника, и находим действующее значение тока пятой гармоники  $I_5$  из выражения:

$$I_5 = \sqrt{I''_{ph}{}^2 - I''_{phmin}{}^2}; \quad (8)$$

- при частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц определяем действующие значения  $I'_{ph}$ , в которых отсутствует третья гармоника, и находим действующее значение тока первой гармоники  $I_1$  из выражения:

$$I_1 = I_{phmin} - I_5; \quad (9)$$

- находим действующие значения тока третьей гармоники из выражения

$$I_3 = \sqrt{I''_{ph}{}^2 - I_1^2 - I_5^2}. \quad (10)$$

Полученная информация о гармонической характеристике защищаемой цепи на основании анализа действующих значений тока, в силу ряда принятых допущений, конечно, не может быть такой же точной, как информация, полученная при использовании известных методик дискретного преобразования Фурье. Однако для построения защит, в частности, защиты от обрыва  $N$ -проводника, в которых полный и точный анализ всего спектра гармоник тока не является целевой функцией, предлагаемый метод получения информации о нижнем участке спектра гармоник может быть вполне пригоден.

Следует отметить, что в электрических сетях, в которых нет  $N$ -проводника, а таковыми, например, являются шахтные сети, в фазных токах нет токов

третьей гармоники. Поэтому для учёта влияния высших гармоник тока на дополнительные потери в электродвигателях путём соответствующей корректировки времятоковой защитной характеристики достаточно ограничиться, используя уравнение (8), определением только значения тока пятой гармоники  $I_5$ .

**ВЫВОДЫ.** Проведенный анализ проблем защиты сетей электроснабжения 0,4 кВ показал, что при использовании в качестве критерия срабатывания расцепителя автоматического выключателя только значения симметричной составляющей аварийного тока построить полноценную релейную защиту невозможно. Необходимы дополнительные параметры защищаемой цепи, формирующие критерий идентификации вида тока возмущения.

Цифровая обработка сигналов, получаемых от датчиков тока, позволяет идентифицировать аварийный режим по степени искажений среднеквадратичных значений тока в переходном режиме возникновения возмущения электрической цепи, возникающих под влиянием нелинейных нагрузок и аperiodической составляющей, и расширить перечень реализуемых защит в расцепителях автоматических выключателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения «Шнейдер Электрик» // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с.
2. Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers // Technical Application Papers. – 2008. – 56 с.
3. Автоматические выключатели 3VT в литом корпусе // Автоматические выключатели Siemens. Каталог LV 36. – 2010. – 265 с.
4. Electrical network protection. Sepam series 20/40/60/80 digital protection relays // Catalogue. – 2013. – 286 с.
5. Electrical network protection Sepam series 80. Protection, metering and control functions // User's manual. – 2013. – 322 с.
6. Беляев А.В., Эдлин М.А. Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кВ // Электрические станции. – 2002. – № 12. – С. 51–55.
7. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 230 с.
8. Райнин В.Е., Кобозев А.С. Выключатели с новыми защитными характеристиками для повышения качества защиты электрических сетей низкого напряжения // Электротехника. – М.: Фирма ЗНАК, 2010. – № 11. – С. 18–24.
9. Сосков А.Г., Кобозев А.С. Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ, 2010. – № 2. – С. 53–63.
10. Кобозев О.С., Серeda О.Г., Моргун В.В. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 5. – С. 21–26.
11. Райнин В.Е., Кобозев А.С. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения // Электротехника. – М.: Фирма ЗНАК, 2009. – № 2. – С. 44–51.
12. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
13. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.
14. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
15. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
16. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля [Электронный ресурс] // Dsplib.ru. Теория и практика цифровой обработки сигналов. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>
17. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А., Красилов И.А. Компьютерные нечистоты. Статья не для всех [Электронный ресурс] // Ferra.ru. Центр электромагнитной безопасности. – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/cascool/s22319>
18. Гармоники тока и напряжения в электросетях [Электронный ресурс] // Матик-Электро. – Режим доступа: <http://www.matic.ru/index.php?pages=735>
19. Philip J.A. Ling, Cyril J. Eldridge. Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment [Электронный ресурс] // Designing next generation electrical systems. – Режим доступа: <http://www.powerstudies.com/sites/www.powerstudies.com/files/DesigningModern.pdf>

#### RELAY PROTECTION DEVICES FUNCTIONALITY AMPLIFICATION BASED RMS CURRENT ANALYSIS

**O. Sereda**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: [lexus\\_suba@mail.ru](mailto:lexus_suba@mail.ru)

The protection devices sensitivity increasing topicality for remote short-circuit currents in the failure protection remote backup implementation is grounded. A possibility of extending the implemented protection list of cir-

cuit breakers trip units, based on the digital processing of signals from the current sensors is justified. Effectiveness to extract more information about the processes in the electrical circuit according to the distortion degree of phase RMS currents during the transitional mode is confirmed. The fast increase current type identification possibility in a transient mode of disturbance electrical circuits is analyzed. The electrical circuit perturbations current type identification examples. The circuit breakers operation blocking criterion for induction motors direct start is proposed.

**Key words:** microprocessor device, current relay protection, sampling frequency, harmonic, root-mean-square current.

## REFERENCES

1. "Electrical installation guide. Technical solutions Schneider Electric" (2009), *Techniskaya collectsiya Schneider Electric*. (in Russian)
2. "Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers" (2008), *Technical Application Papers*.
3. "3VT Moulded Case Circuit Breaker" (2010), *Avtomatičeskiye viklyuchately Siemens*. (in Russian).
4. "Electrical network protection" (2013), *Sepam series 20/40/60/80 digital protection relays. Catalog*.
5. "Electrical network protection Sepam series 80. Protection, metering and control functions" (2013), *User's manual*.
6. Belyaev, A.V. and Edlin, M.A. (2002), "Protection and circuit breakers failure remote backup in networks 0,4 kV", *Elektricheskie stantsii*, no. 12, pp. 51–55. (in Russian)
7. Belyaev, A.V. (2008), *Vybor apparatury, zashchit i kabeley v setyakh 0,4 kV* [Selection of equipment, protection and cable in the networks 0,4 kV], PEIPK, St. Petersburg, Russia. (in Russian)
8. Rainin, V.E. and Kobozev, A.S. (2010), "Circuit breakers with new security features to improve the electric low-voltage networks protection quality", *Elektrotehnika*, no. 11, pp. 18–24. (in Russian)
9. Soskov, A.G. and Kobozev, A.S. (2010), "The modernization of the system of protection of the city electric networks 0,4 kV through the use of microprocessor technology in trips breakers", *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*, no. 2, pp. 53–63. (in Ukrainian)
10. Kobozev, A.S., Sereda, O.G. and Morgun, V.V. (2012), "RMS periodic non-sinusoidal current determination and its odd harmonics of the continuous time current dependence discrete values", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 5, pp. 21–26. (in Ukrainian)
11. Rainin, V.E. and Kobozev, A.S. (2009), "Improvements of protective characteristics of automatic low-voltage circuit breakers", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 44–51. (in Russian)
12. Zhezhelenko, I.V. (1986), *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [The higher harmonics in industrial plants power systems], Energoatomizdat, Moscow, Russia. (in Russian)
13. Basarab, M.A., Zelkin, E.G., Kravchenko, V.F. and Yakovlev, V.P. (2004), *Tsifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittkeera-Kotelnikova-Shennona* [Digital signal processing based on the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem], Radiotekhnika, Moscow, Russia. (in Russian)
14. GOST 13109–97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems.
15. Blahut, Richard (1989), *Bystrye algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov* [Fast Algorithms of Digital Signal Processing], Translated from English, Mir, Moscow, Russia. (in Russian)
16. "Dynamic conversion of spectral samples per cycle rate. The modified Goertzel Algorithm", Dsplib.ru. Theory and practice of digital signal processing, available at: [www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html](http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html) (accessed September 6, 2013). (in Russian)
17. Grigoriev, O.A., Petukhov, V.S., Sokolov, V.A. and Krasilov, I.A. (2013), "Computer impurity. The article is not for everyone", Ferra.ru. Center for Electromagnetic Safety, available at: [www.ferra.ru/online/casecool/s22319](http://www.ferra.ru/online/casecool/s22319) (accessed September 6, 2013). (in Russian)
18. "Harmonic current and voltage in electric", Matic-Electro, available at: [www.matic.ru/index.php?pages=735](http://www.matic.ru/index.php?pages=735) (accessed September 6, 2013). (in Russian)
19. Philip, J.A. Ling and Cyril, J. Eldridge (2013), "Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment", Designing next generation electrical systems, available at: [www.powerstudies.com/sites/www.powerstudies.com/files/DesigningModern.pdf](http://www.powerstudies.com/sites/www.powerstudies.com/files/DesigningModern.pdf) (accessed September 6, 2013).

Стаття надійшла 13.09.2013.