


**BRANCHED ELECTRIC POWER GRIDS EMERGENCY MODE DIAGNOSING  
 BASED RMS CURRENT ANALYSIS**
**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ  
 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ  
 ТОКА**

Dosent, PhD O.G. Sereda

National technical university “Kharkov polytechnical institute” – Kharkov, Ukraine

**Abstract:** *How the digital processing of signals from the current sensors allows to empower of circuit breakers trip units protective ability is shown. The RMS phase currents distortion degree in the electrical circuit the emergency type identification possible is demonstrated.*

**KEY WORDS:** MICROPROCESSOR CURRENT RELAY PROTECTION DEVICE

**1. 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 электроснабжения с целью идентификации аварийных ситуаций (короткое замыкание (КЗ) в месте установки аппарата, удалённое КЗ, обрыв нейтрального проводника) 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, к которым нечувствительны сами выключатели [1-3]. Например, терминалы БМРЗ-0,4 [4] способны по соотношению приращений активной и реактивной составляющих тока прямой последовательности, обеспечить защиту от удалённых КЗ (дальнее резервирование).

Кроме проблем связанных с обеспечением дальнего резервирования существует ряд задач, которые приходится решать, привлекая для анализа аварийных ситуаций кроме среднеквадратичного значения фазного тока  $I_{ph}$  и другие параметры защищаемой цепи. Так при реализации мгновенной защиты  $I$  («отсечки») для быстрого её срабатывания в качестве критерия используют мгновенные значения тока  $i_j$  в момент возникновения тока возмущения. Однако параметр  $i_j$  не позволяет обеспечить надёжную селективность работы выключателей [5, 6].

Отдельно отметим проблему нелинейных искажений синусоиды фазных токов и, как следствие, появление высших гармоник тока, без учета 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, так как математический аппарат указанных методов существенно отличается от математического аппарата, традиционно используемого в расцепителях АВ [7].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – проанализировать существующие проблемы в организации релейной защиты электрических сетей и способы их решения на основе оценки действующих значений тока вычисленных различными методами с целью определения необходимых параметров для идентификации вида тока возмущения электрической цепи.

**2. Материал исследований.**

Для иллюстрации проблем в организации релейной защиты электрических сетей и наглядности изложения путей их решения на рис. 1 приведена типичная 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  $t_{sd1}$  [5, 6].

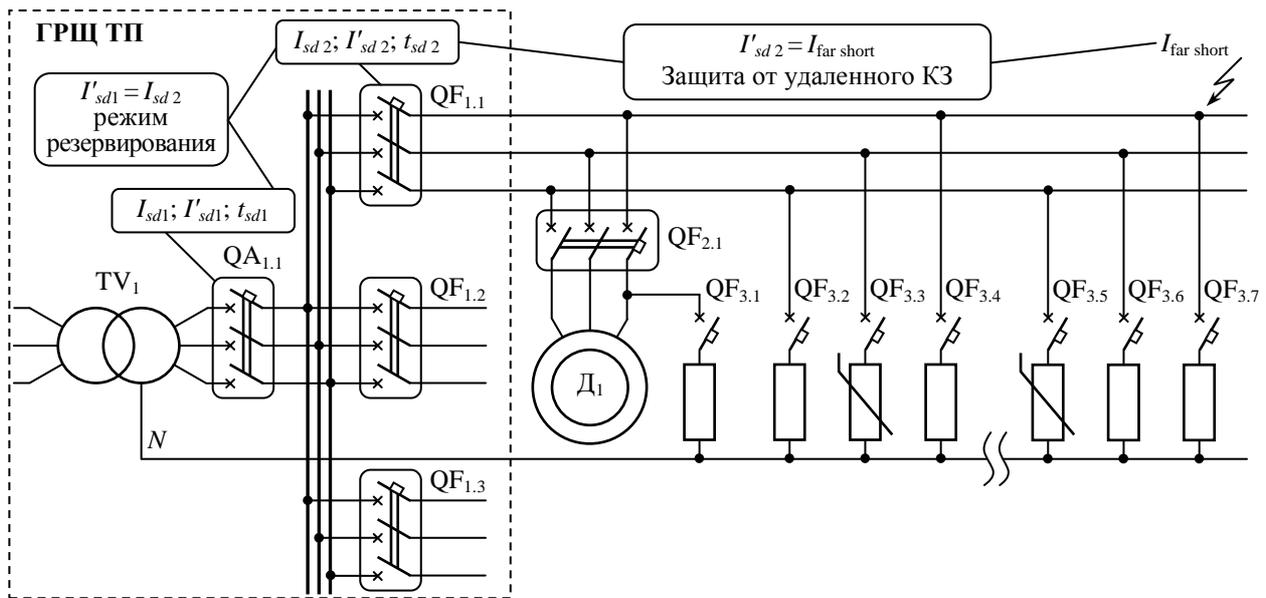


Рис. 1 – Схема распределительной сети электроснабжения 0,4 кВ

Так как расстояние между выключателями QA<sub>1.1</sub> и QF<sub>1.1</sub> 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 аperiодической составляющей в первый период возникновения тока возмущения. Поэтому необходимы дополнительные 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 коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , а значит величина электромагнитной постоянной электрической цепи  $\tau$ , то по значениям  $i_j$  можно оценить величину  $I_{ph}$ . Но при этом не обеспечивается достаточная точность, необходимая для надежной селективной работы близко расположенных выключателей. Обусловлено это влиянием на значения  $i_j$  такого случайного фактора, как фаза  $\psi$  возникновения тока возмущения.

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<sub>1.1</sub> и за выключателем QF<sub>1.1</sub> (рис. 1), построенные для двух значений фазы  $\psi = 0$  и  $\psi = \varphi$  возникновения тока возмущения. Принятые значения  $\psi$  определяют границы диапазона, 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), идентифицировать место КЗ за выключателем QA<sub>1.1</sub> или QF<sub>1.1</sub> 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, значимо 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  $\tau$ . Указанные

параметры объединяет силовая функция электрической цепи  $S(t)$ , которая представляет собой зависимость от времени суммы квадратов мгновенных значений токов всех трех фаз [8]:

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

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

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

Выражение (2) показывает, что в любой фиксированный момент времени  $t_j$ , если определить сумму  $\sum_{a,b,c} i_j^2$  и подставить в формулу (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  $\cos\varphi = 0,2$  и  $k_\tau = 1,04$  при  $\cos\varphi = 0,3$ .

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 формуле (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.

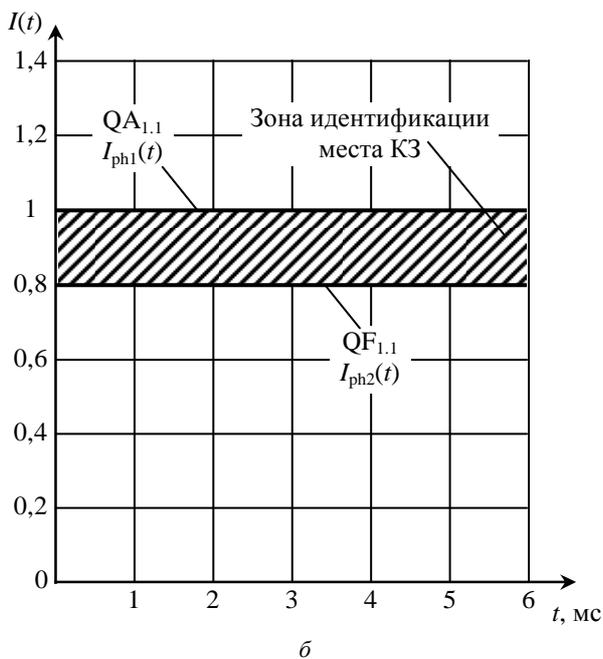
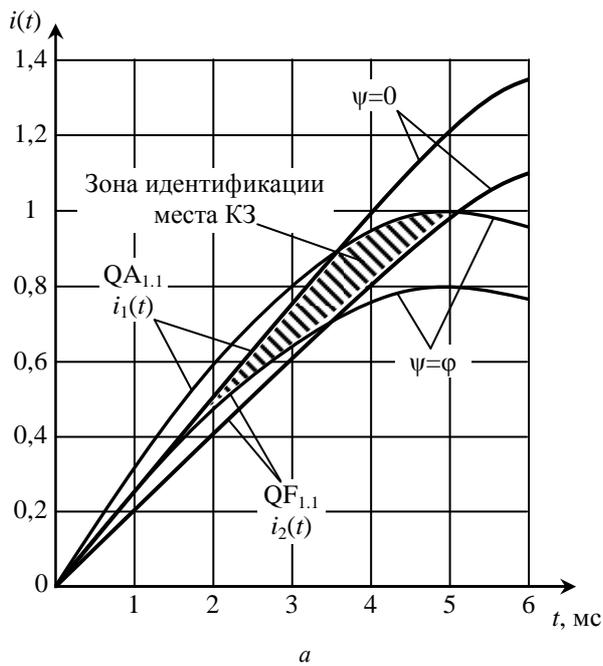


Рис. 2 – Идентификация места КЗ

ДАЛЬНЕЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ. На схеме (рис. 1) удалённое КЗ на линии показано в месте инсталляции 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  $I_{far\ short}$  удалённого КЗ. Очевидно, что одного параметра  $I_{ph}$  недостаточно для идентификации пускового тока и блокировки срабатывания защиты. Поэтому, как уже упоминалось, в терминалах БМРЗ-0,4 для идентификации пусковых токов кроме величины действующего значения тока приращения (возмущения) цепи  $\Delta I_{ph}$  определяются еще активная и реактивная составляющие 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 (пуск ЭД или КЗ) то для корректного определения величины  $\Delta I_{ph}$  методом интегрирования квадратов дискретных значений тока  $i_j^2$  необходимо отсутствие аperiodической составляющей в кривой тока. Выполнить это условие можно или путем задержки расчета  $\Delta I_{ph}$  на 1÷2 периода  $T$  изменения тока, или существенно расширив временной интервал, в течение которого производится интегрирование  $(3÷4)T$ . Если же расчет  $\Delta I_{ph}$  производить в первый период  $T_1$  после возникновения тока возмущения, то будут иметь место искажения, обусловленные влиянием переходного процесса изменения тока. Степень искажения величины  $\Delta I_{ph}$  зависит от характера переходного процесса, то есть от величины постоянной времени  $\tau$ . Поэтому возможно по величине искажения, возникающего при расчете  $\Delta I_{ph}$  в период  $T_1$ , определить значение  $\tau$  или  $\cos\phi$ . Чтобы реализовать эту возможность, необходим такой метод анализа, который бы давал однозначный результат при разных начальных фазах  $\psi$  возникновения тока возмущения. Анализ степени искажения величины  $\Delta I_{ph}$  отдельно в каждой фазе не дает однозначности результата расчета. Массив дискретных значений  $i_j$  и рассчитанных по ним значений  $\Delta I_{ph}$  зависит 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 за первый  $T_1$  период после возникновения возмущения может быть выражена так:

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

где  $\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$  – мгновенные значения токов возмущения в каждой фазе  $a, b, c$ .

Сопоставляя выражение (3) с выражением для силовой функции цепи (1) 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, 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  $\cos\phi = 0,7$ .

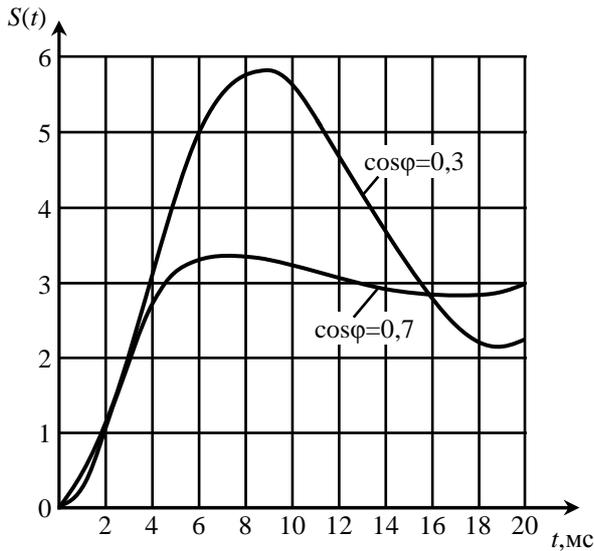


Рис. 3 – Изменение силовой функции во времени

При  $\cos\varphi = 0,3$  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  $\cos\varphi = 0,7$  интеграл функции  $S(t)$  за период  $T_1$  примерно на 10% меньше, чем за период  $T_2$ . При  $\cos\varphi = 0,5$  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 значение  $\Delta I_{phT_2}$ , рассчитанное 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 аperiodической составляющей, можно идентифицировать вид тока возмущения.

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  $N$ -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 и штатного, при котором отсутствует обрыв  $N$ -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 кратным 3 и арифметической суммой третьей  $I'_3$  и кратных ей гармоник тока:

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

где  $I'_1, I'_3$  – ожидаемый ток 1-й и 5-й 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 [9]. Так как в цепях электродвигателей нет третьей гармоники тока, а в фазных токах в большинстве случаев наиболее значимыми по величине являются 1-я, 3-я и 5-я гармоники, то наиболее опасной для электродвигателей остается 5-я 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 [10], частота дискретизации должна быть больше удвоенной частоты  $f_k$  наиболее высокой  $k$ -й гармоники. Если наиболее значимыми являются 1-я, 3-я, 5-я гармоники, то  $f_d$  должна быть  $f_d > 2 f_5 > 500$  Гц. Кроме того, согласно [11] частота дискретизации должна быть не менее 3 кратной по отношению к частоте  $f_k$ . При невыполнении указанных требований рассчитанное значение  $I_{ph}$  претерпит искажений, обусловленных 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 аperiodической 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 распределительных сетях 0,4кВ, параметр  $I_{ph}$  позволяет определить гармонический спектр фазных токов.

Теория и различные методы гармонического анализа спектра периодического сигнала достаточно хорошо разработаны и используются в различных областях науки и техники. Кроме классических методов решения прикладных задач с использованием дискретного преобразование Фурье (ДПФ), разработаны альтернативные методы, например, алгоритм Герцеля [12] и его модифицированный вариант [13]. Однако эти методы используют математический аппарат, существенно отличающийся от традиционно используемого 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 гармонического спектра фазных токов обусловлена тем, что нелинейные нагрузки, приводящие к искажениям фазных токов, формируют кривую фазного тока  $i_{ph}(t)$ , которая, с определённым допущением, описывается функцией, симметричной относительно начала координат. В [14-16] показаны зависимости  $i_{ph}(t)$  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 (1-я, 3-я и 5-я). Поэтому, с допущениями, не критичными для построения сетевых защит, можно принять, что все нечетные гармоники во всех фазах имеют одинаковую нулевую начальную фазу. Значит, вектор тока 5-й гармоники должен вращаться в противоположном направлении по отношению к вращению вектора тока основной 1-й гармоники. То есть начальные фазы векторов токов 1-й и 5-й 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 3 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 3-й ( $f'_d = 300$  Гц) и 5-й ( $f''_d = 500$  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.

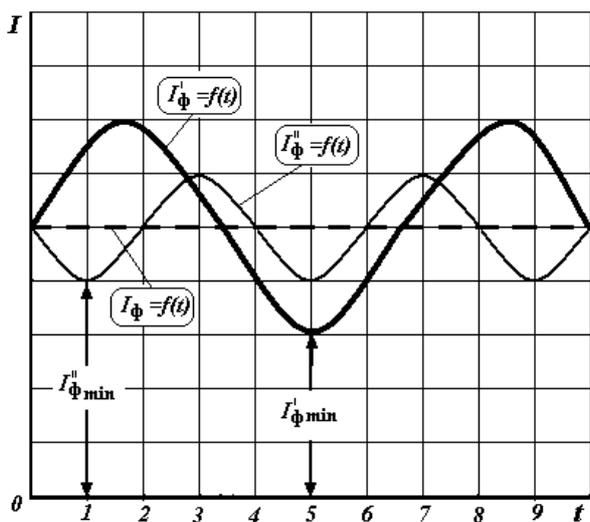


Рис. 4 – Результаты расчета действующих значений фазного тока при различных частотах дискретизации

При расчете зависимости  $I''_{ph} = f(t)$  с частотой  $f''_{ph} = 500$  Гц выполняется требование точного определения действующих значений токов только 1-й и 3-й гармоник. Величина  $I_5$  тока 5-й гармоники не может быть без искажений учтена в суммарном фазном токе. 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, 5-й 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 действующего значения  $I''_{phmin}$  ток 5-й гармоники отсутствует, а в значении  $I_{ph}$  учтены все три гармоники тока, определение величины  $I_5$  не представляет трудностей.

При частоте дискретизации  $f'_{ph} = 300$  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  $I_3$  3-й 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 1-й гармоники. При этом величина  $I'_{phmin}$  будет включать в себя как действующий ток 1-й гармоники  $I_1$ , так и действующий ток 5-й 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 значениям  $i_{j(750)}$ , с частотой дискретизации  $f_d = 750$  Гц. Восстановленная по значениям  $i_{j(300)}$  зависимость тока 5-й гармоники от времени трансформируется в зависимость  $i_{5(300)}(t)$  с частотой 1-й гармоники. На рис. 5 показаны дискретные значения тока 5-й 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 1-й гармоники тока  $i_1(t)$ . При этом начальная фаза тока 5-й гармоники  $i_5(t)$  по отношению к току  $i_1(t)$ , как было указано ранее, сдвинута на угол  $180^\circ$  (находятся в противофазе).

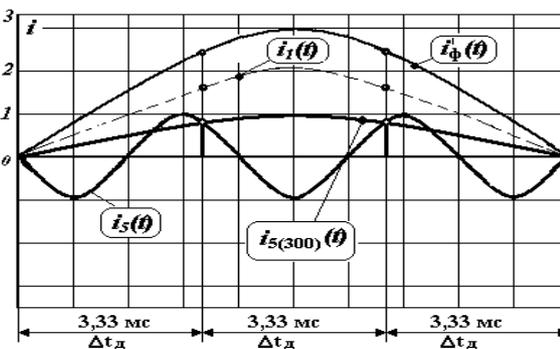


Рис. 5 – Результаты расчета временных зависимостей гармоник фазного тока при частоте дискретизации  $f'_d = 300$  Гц

Так как в данном случае общий фазный ток  $I'_{\text{phmin}}$  состоит из двух, одинаковых по частоте и фазе гармоник, то можно записать следующее простое равенство  $I'_{\text{phmin}} = I_1 + I_5$ , из которого легко определить значение тока 1-й гармоники.

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

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

- при частоте дискретизации  $f_d'' = 500$  Гц определяем действующие значения  $I''_{\text{ph}}$ , в которых отсутствует 5-я гармоника, и находим действующее значение тока 5-й гармоники  $I_5$  из выражения:

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

- при частоте дискретизации  $f_d' = 300$  Гц определяем действующие значения  $I'_{\text{ph}}$ , в которых отсутствует 3-я гармоника, и находим действующее значение тока первой гармоники  $I_1$  из выражения:

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

- находим действующие значение тока 3-й гармоники из выражения:

$$I_3 = \sqrt{I_{\text{ph}}^2 - I_1^2 - I_5^2}. \quad (10)$$

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 для 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 электрических сетях, в которых нет  $N$ -проводника, а таковыми, например, являются шахтные сети, в фазных токах нет токов 3-й 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 значение тока 5-й гармоники  $I_5$ .

### 3. Выводы

Проведенный анализ проблем защиты сетей электроснабжения 0,4кВ показал, что при использовании в качестве критерия срабатывания расцепителя автоматического выключателя только значения симметричной составляющей аварийного тока, построить полноценную защиту невозможно. Необходимы дополнительные параметры защищаемой цепи, которые характеризуют вид тока возмущения электрической цепи.

Информация о таких параметрах, как  $\cos\phi$  и гармонический спектр фазного тока, извлекается из анализа действующих значений тока, вычисленных в интервале времени, когда возникают искажения под влиянием нелинейных нагрузок и аperiodической составляющей в переходном режиме. Цифровая обработка сигналов, получаемых от датчиков тока, позволяет исключить искажения вычисленной величины

среднеквадратичного значения фазного тока в переходном режиме.

Использование для определения всех, необходимых параметров для идентификации вида аварийного процесса исключительно только действующих значений тока, позволяет оптимизировать алгоритм работы микропроцессорного устройства при реализации новых видов защит.

### 4. References

1. Electrical installation guide. Technical solutions «Schneider Electric» / Technical collection Schneider Electric. – 2009. – 469 с.
2. Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers / Technical Application Papers. – 2008. – 56 p.
3. 3VT Moulded Case Circuit Breaker / The Siemens circuit breakers. Directory LV 36. – 2010. – 265 p.
4. Belyaev A.V. Protection and circuit breakers failure remote backup in networks 0.4 kV / A.V. Belyaev, M.A. Edlin // Power Plants. – 2002. – №12. – P. 51-55.
5. Rainin V.E. Circuit breakers with new security features to improve the electric low-voltage networks protection quality / V.E. Rainin, A.S. Kobozev // Russian Electrical Engineering. – 2010. – №11. – P. 18-24.
6. Soskov A.G. The modernization of the system of protection of the city electric networks 0,4 kV through the use of microprocessor technology in trips breakers / A.G. Soskov, A.S. Kobozev // Light and Power Engineering. – 2010. – №2. – P. 53-63.
7. Kobozev A.S. RMS periodic non-sinusoidal current determination and its odd harmonics of the continuous time current dependence discrete values / A.S. Kobozev, O.G. Sereda, V.V. Morgun // Electrical engineering and electromechanics. – 2012. – №5. – P. 21-26.
8. Rainin V.E. Improvements of protective characteristics of automatic low-voltage circuit breakers / V.E. Rainin, A.S. Kobozev // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Т.80. – №2. – P. 102-108.
9. Zhezhenko I.V. The higher harmonics in industrial plants power systems. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 168 p.
10. Basarab M.A., Zelkina E.G., Kravchenko V.F., Yakovlev V.P. Digital signal processing based on the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem. – Moscow: Communications Technology, 2004. – 72 p.
11. ISO 13109-97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems.
12. Richard E. Blahut. Fast Algorithms of Digital Signal Processing. Addison-Wesley, 1985. – 455 p.
13. Dynamic conversion of spectral samples per cycle rate. The modified Goertzel Algorithm / Dsplib.ru. Theory and practice of digital signal processing.: <http://www.dsplib.ru/con-tent/goertzelmod/goertzelmod.html>.
14. Grigoriev O.A., Petukhov V.S., Sokolov V.A., Krasilov I.A. Computer impurity. The article is not for everyone [Electronic resource] / Ferra.ru. Center for Electromagnetic Safety. // [www.ferra.ru/online/casecool/s22319](http://www.ferra.ru/online/casecool/s22319).
15. Harmonic current and voltage in electric [Electronic resource] / Electro -Matic.: <http://www.matic.ru/index.php?pages735>.
16. Philip J. A. Ling, Cyril J. Eldridge. Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment [Electronic resource] / Designing next generation electrical systems.: <http://www.powerstudies.com/sites/www.powerstudies.com/files/DesigningModern.pdf>.