



PS1 – Poster-21



Централизованная система селективной сигнализации замыканий на землю и диагностики изоляции распределительных сетей среднего напряжения

В.А. ШУИН¹, О.А. САРБЕЕВА¹, Е.С. ШАГУРИНА¹, А.Л. КУЛИКОВ²,
А.А. ПЕТРУХИН²

Ивановский государственный энергетический университет¹,
Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» Нижегородское ПМЭС²
Россия

shuin@rza.ispu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрические сети среднего напряжения, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, сигнализация замыканий на землю, диагностика изоляции.

1 ВВЕДЕНИЕ

Техническое совершенство устройств защиты и селективной сигнализации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения 6-10 кВ в значительной мере определяет надежность электроснабжения потребителей. Известно, что фиксацией кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции, составляющих 70-90% общего числа ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, и использованием информации о них в целях диагностики состояния изоляции элементов сети можно предотвратить до 30-50% внезапных (от релейной защиты) отключений электродвигателей и кабельных линий [1 - 3]. Фиксацию кратковременных самоустраняющихся ОЗЗ позволяют осуществить устройства защиты и селективной сигнализации, основанные на использовании переходных процессов, однако такие устройства не обладают непрерывностью действия при устойчивых ОЗЗ, необходимой в разветвленных сетях для определения поврежденного элемента.

Исследования и опыт внедрения разработок Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) показали, что технически наиболее совершенное решение в части устройств защиты и селективной сигнализации ОЗЗ позволяют получить направленные комбинированные устройства, основанные на использовании фазовых соотношений электрических величин переходного процесса и установившегося режима замыкания на землю. Комбинация в одном устройстве двух способов направленной защиты обеспечивает возможность селективно определять поврежденное присоединение при всех разновидностях ОЗЗ (устойчивых, кратковременных самоустраняющихся, прерывистых дуговых, включая дуговые перемежающиеся), а также обеспечивает непрерывность действия при устойчивых замыканиях на землю [3]. Применение микропроцессорной элементной базы и современных методов цифровой обработки сигналов позволяет существенно повысить техническое совершенство комбинированных направленных устройств защиты и селективной сигнализации, в частности, повысить устойчивость функционирования при малых значениях подведенных величин в условиях воздействия шумов и помех и фазовых (угловых) погрешностей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП). Указанные возможности реализованы в централизованном микропроцессорном устройстве селективной сигнализации ОЗЗ и диагностики изоляции

электрических сетей среднего напряжения, выполненном на основе способа [4] и разработанном совместно Нижегородским ПМЭС – Филиалом ОАО «ФСК ЕЭС» и ИГЭУ.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Фазовые соотношения электрических величин переходного процесса и способы их контроля при выполнении направленных защит от ОЗЗ. Для установившегося режима ОЗЗ в в сетях радиальной конфигурации справедливы следующие соотношения между напряжением нулевой последовательности $u_0(t)$ и токами нулевой последовательности в неповрежденном $i_{0\text{неп}}(t)$ и в поврежденном $i_{0\text{пов}}(t)$ присоединениях:

$$3i_{0\text{неп}} = 3C_{0\text{неп}} \frac{du_0}{dt}; \quad (1)$$

$$3i_{0\text{пов}} = -\sum_k 3C_{0k\text{неп}} \frac{du_0}{dt} = -\sum_k 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{пов}}) \frac{du_0}{dt}, \quad (2)$$

где $C_{0\text{неп}}$ и $C_{0\text{пов}}$ – соответственно емкость фазы на землю неповрежденного k -го и поврежденного присоединения; $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы сети на землю.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в ИГЭУ (например, [2]) показали, что в спектре частот до единиц килогерц соотношения (1) и (2) приблизительно выполняются также для токов и напряжений переходного процесса и высших гармоник установившегося режима ОЗЗ даже с учетом распределенного характера параметров линий сети. В [1, 2] с учетом соотношений (1) и (2) показано, что в направленных защитах от ОЗЗ, основанных на использовании начальных фазовых соотношений электрических величин переходного процесса, в качестве поляризующей величины целесообразно использовать не напряжение $u_0(t)$, а производную du_0/dt , что обеспечивает нечувствительность устройства защиты к возможным за счет смещения нейтрали сети $u_N(0)$ искажениям начальных соотношений знаков между напряжением $u_0(t)$ и током $i_0(t)$.

Для определения направления (знака) мощности нулевой последовательности переходного процесса в импульсных устройствах защит от ОЗЗ используются два основных подхода:

1) фиксация знака мгновенной мощности нулевой последовательности в момент пробоя изоляции фазы сети на землю по соотношению начальных знаков переходного тока $i_0(t)$ или суммы свободных составляющих $i_{0\text{св}}(t) = i_{0\text{р}}(t) + i_{0\text{з}}(t)$ и поляризующей величины: $u_0(t)$, du_0/dt или $du_{0\text{св}}/dt$ (практически в известных исполнениях импульсных направленных устройств защиты от ОЗЗ фиксация знаков сравниваемых величин происходит через 20-40 микросекунд после пробоя изоляции для отстройки от переходных процессов в трансформаторе напряжения, искажающих начальный знак переходного напряжения $u_0(t)$) [1, 2, 5 и др.];

2) определение знака среднего значения мощности нулевой последовательности на всем интервале времени существования переходного тока $i_0(t)$.

Первый из указанных способов контроля направления мощности нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ используется в большинстве известных исполнений импульсных направленных устройств защиты от ОЗЗ: «Импульс», УЗС-01 др. [1, 2, 5 и др.]. Недостатком способа является возможность искажения результатов мгновенной фиксации знака мощности и отказа функционирования устройства защиты за счет влияния импульсных помех во вторичных цепях тока и напряжения и угловых погрешностей, обусловленных прежде всего ТТНП.

Второй способ в принципе обеспечивает более высокую устойчивость функционирования защиты как при внутренних, так и при внешних ОЗЗ в условиях влияния импульсных помех, шумов, угловых погрешностей ТТНП.

Непрерывный контроль знака среднего значения мощности нулевой последовательности в переходном режиме ОЗЗ при использовании в качестве поляризующей величины производной du_0/dt может быть реализован на основе алгоритмов, описываемых следующими соотношениями:

$$J_1 = \int_0^{t_n} i_0(t) \cdot \frac{du_0(t)}{dt} dt; \quad (3)$$

$$J_2 = \int_0^{t_n} \text{sign}(i_0(t)) \cdot \text{sign}\left(\frac{du_0(t)}{dt}\right) dt; \quad (4)$$

$$J_3 = \max_{0 < \tau < t_n} \int_0^{t_n} i_0(t + \tau) \cdot \frac{du_0(t)}{dt} dt, \quad (5)$$

где t_n - время наблюдения переходного процесса ОЗЗ (время срабатывания направленного измерительного органа защиты).

Из уравнений (1) и (2) следует, что значение интегральной величины $J_1 - J_3$ в (3) – (5) для поврежденного присоединения всегда отрицательно, а для всех неповрежденных присоединений положительно.

Способ, основанный на вычислении интегральной величины J_2 по (4) используется, в частности в направленном устройстве защиты от ОЗЗ типа «Спектр», разработанном в ИГЭУ [2, 3], и фактически реализует известный способ сравнения времени совпадения с временем несовпадения.

Значение интегральной величины J_3 по (5) соответствует временной взаимной корреляционной функции совокупности мгновенных значений тока нулевой последовательности и скорости нарастания (производной) напряжения нулевой последовательности при выбранном параметре t_n .

Эффективность каждого из указанных выше трех способов выполнения направленной защиты от ОЗЗ в значительной мере определяется его чувствительностью к влиянию фазовых (угловых) погрешностей, обусловленных ТТНП, трансформаторами напряжения и другими элементами схемы формирования сравниваемых величин. Для оценки чувствительности к влиянию фазовых погрешностей на математических моделях «электрическая сеть – устройство защиты от ОЗЗ по способу 1 (2, 3)», выполненных в системе моделирования Matlab, были выполнены расчеты отношения «сигнал / помеха». Для способа 1, основанного на оценке отношения «сигнал / помеха» определялось по выражению

$$K_{1C/П}(t_c) = \frac{J_{1C}}{J_{1П}} = \frac{\int_0^{t_n} \left[i_0^{(+)}(t + t_c) \cdot \frac{du_0^{(+)}(t)}{dt} + i_0^{(-)}(t + t_c) \cdot \frac{du_0^{(-)}(t)}{dt} \right] dt}{-\int_0^{t_n} \left[i_0^{(+)}(t + t_c) \cdot \frac{du_0^{(-)}(t)}{dt} + i_0^{(-)}(t + t_c) \cdot \frac{du_0^{(+)}(t)}{dt} \right] dt}, \quad (5)$$

где J_{1C} - интеграл, соответствующий моментам совпадения знаков полуволн тока $i_0(t)$ и производной du_0/dt , $J_{1П}$ - интеграл, соответствующий моментам несовпадения знаков полуволн $i_0(t)$ и производной du_0/dt ; t_c – временной сдвиг сигнала тока $i_0(t)$, учитывающий влияние угловых погрешностей ТТНП и других элементов схемы формирования сравниваемых величин.

Для способов 2 и 3, основанных на оценке интегральных величин J_2 и J_3 по (4) и (5) отношение «сигнал / помеха» определялось аналогично.

На рис. 1 приведены зависимости отношения «сигнал / помеха» $K_{C/П}$ от значения t_c .

Из данных, приведенных на рис. 1, можно видеть, что в отличие от способов 1 и 2 способ, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции в наибольшей степени обеспечивает нечувствительность направленной защиты к влиянию фазовых сдвигов между сравниваемыми величинами, обусловленными угловыми погрешностями ТТНП и других элементов устройства защиты. Исследования на комплексных математических моделях «электрическая сеть – устройство защиты от ОЗЗ», показали также, что выполнение защиты от ОЗЗ по способу 3 обеспечивает повышение устойчивости функционирования в условиях влияния шумов и импульсных помех.

Функционально-структурная схема централизованной системы селективной сигнализации ОЗЗ и диагностики состояния изоляции сети. Упрощенная функционально-логическая схема устройства, реализующего предлагаемый способ [4], приведена на рис. 2.

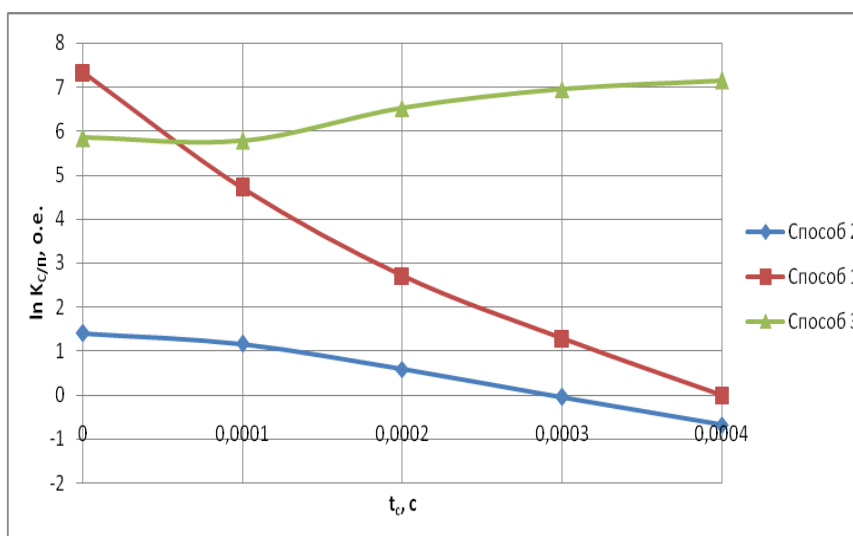


Рис. 1: Зависимости отношения «сигнал / помеха» $K_{СП}$ от значения t_c для способов 1, 2 и 3

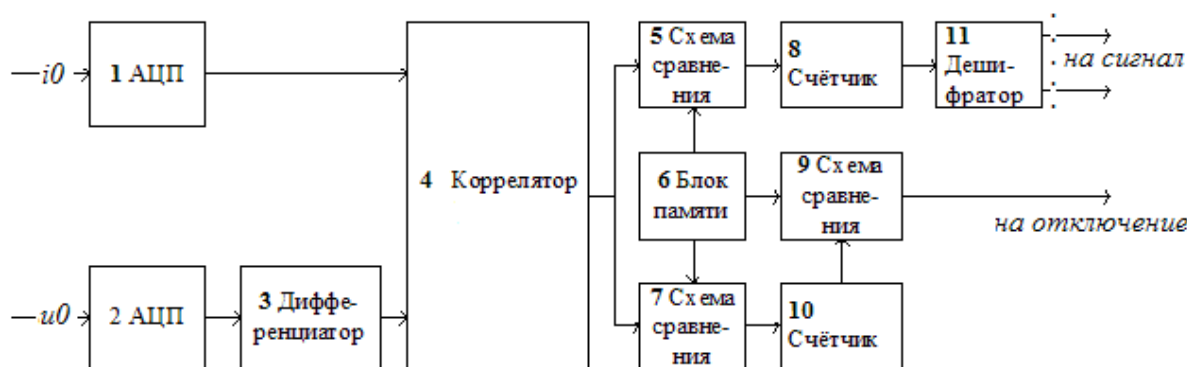


Рис. 2: Функционально-логическая схема устройства сигнализации ОЗЗ по способу [4]

Устройство включает: первый 1 и второй 2 аналого-цифровой преобразователь (АЦП), дифференциатор 3 (вычислитель производной), коррелятор 4, первую 5, вторую 7 и третью 9 схемы сравнения, блок памяти 6, первый 8 и второй 10 счетчики и дешифратор 11. Способ реализуется следующим образом.

При возникновении замыкания на землю на входы блоков аналого-цифрового преобразователя 1 и 2 поступают соответственно ток нулевой последовательности i_0 и напряжение нулевой последовательности U_0 от измерительных трансформаторов. После аналого-цифрового преобразования в блоке 1 цифровые отсчеты тока нулевой последовательности поступают на первый вход коррелятора, а на второй вход коррелятора подаются цифровые отсчеты, пропорциональные скорости нарастания напряжения нулевой последовательности, образующиеся после аналого-цифрового преобразования в блоке 2 и дифференцирования в блоке 3 напряжения нулевой последовательности. Коррелятор 4 осуществляет операцию цифровой свертки над отсчетами, поступающими на его вход. На его выходе образуются цифровые коды, являющиеся дискретными аналогами выражения (5). Вместо коррелятора для выполнения операции свертки может использоваться цифровой фильтр. При этом один из дискретных сигналов (например, цифровые отсчеты тока нулевой последовательности) выступает в роли импульсной характеристики цифрового фильтра. С выхода коррелятора 4 цифровые отсчеты поступают на первые входы схем срабатывания 5 и 7, а на их вторые входы с блока памяти 6 поступают цифровые коды уставок. При этом для схемы сравнения 5 подается уставка, характеризующая режим неустойчивого прерывистого ОЗЗ, а схемы сравнения 7 – уставка, характеризующая режим устойчивого ОЗЗ. Разница в уставках обусловлена необходимостью обеспечения разного отношения сигнал / шум в режимах устойчивого и неустойчивого замыканий. При устойчивом ОЗЗ количество превышений

уставки подсчитывается счетчиком 10, выход которого соединен с первым входом схемы срабатывания 9. На второй вход схемы сравнения 9 с блока памяти 6 подается цифровой код, характеризующий временной интервал, начиная с которого классифицируют ОЗЗ, как устойчивое. При превышении этого временного интервала на выходе схемы сравнения появляется сигнал командного воздействия на исполнительные органы устройства.

При неустойчивом однофазном замыкании на землю количество превышений значения уставки подсчитывается счетчиком 8, выход которого соединен с дешифратором 11. В зависимости от цифрового кода (числа превышений значения уставки) с выхода счетчика 8 на одном из выходов дешифратора 11 появляется сигнал. При этом состояние изоляции анализируемой фазы сети, связанное с числом произошедших пробоев изоляции, можно характеризовать номером выхода дешифратора 11, на котором появился сигнал. Эта информация (номер выхода дешифратора) может выступать в качестве диагностической (сигнальной) или служить для обеспечения командного воздействия на исполнительные органы устройства защиты, действующие на отключение.

Испытания алгоритмов функционирования устройства селективной сигнализации ОЗЗ по способу [4]. Апробирование алгоритмов обнаружения ОЗЗ по способу [4] осуществлялось на испытательном комплексе (рис. 3), включающем два персональных компьютера, и отладочного прототипа устройства защиты от ОЗЗ по способу [4], выполненного на базе микропроцессорного набора типа TMDXOSKL137BET (рис. 4).

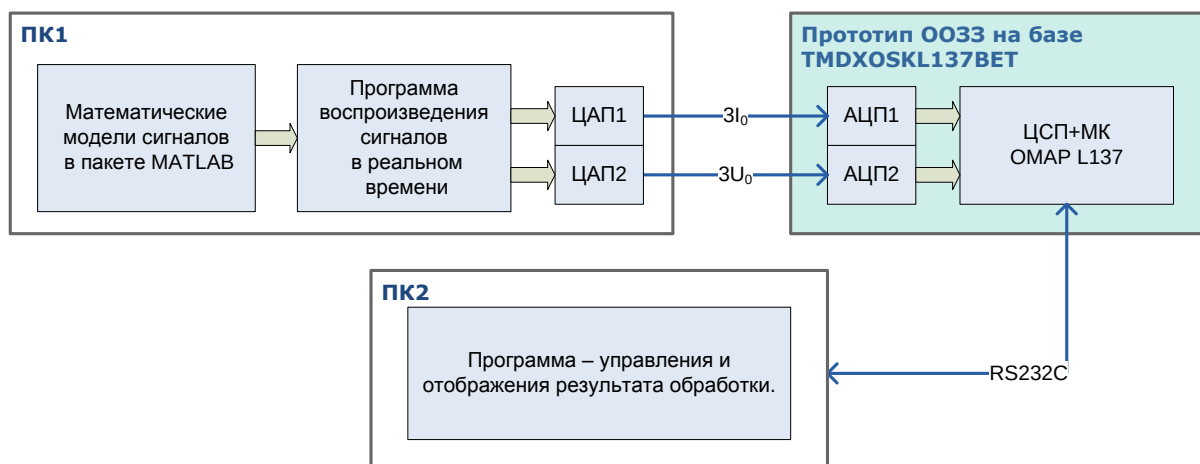


Рис. 3: Структура комплекса для испытаний алгоритмов функционирования отладочного прототипа устройства сигнализации ОЗЗ по способу [4]



Рис. 4: Фото платы TMDXOSKL137BET, реализующей микропроцессорную часть устройства сигнализации ОЗЗ по способу [4]

С использованием первого компьютера моделировались сигналы тока $i_0(t)$ и $u_0(t)$ при различных разновидностях ОЗЗ (однократные пробой изоляции по теории Петерсена и Петерса

и Слепяна, дуговые перемежающиеся и устойчивые ОЗЗ). Тестовые сигналы тока $i_0(t)$ и $u_0(t)$ были получены на математических моделях электрических сетей 6-10 кВ, выполненных в среде Matlab. При создании базы тестовых сигналов варьировались параметры контролируемой сети 6-10 кВ, параметры поврежденной линии (в частности, удаленность места пробоя изоляции от шин), характер дугового прерывистого ОЗЗ и др.

Полученные указанным способом сигналы $i_0(t)$ и $u_0(t)$ воспроизводились программой воспроизведения и после цифро-аналогового преобразования с частотой цифровых выборок 44,1 кГц подавались на аналоговые входы прототипа обнаружителя ОЗЗ.

Отладочный прототип устройства сигнализации ОЗЗ, выполненного по способу [4], состоит из двух АЦП с частотой цифровых выборок 48 кГц и двухядерного цифрового сигнального процессора OMAP-L137 компании Texas Instruments, позволяющего реализовать вышеуказанные алгоритмы свёртки и обнаружения неустойчивых ОЗЗ в реальном масштабе времени.

Программное обеспечение (ПО) отладочного прототипа устройства сигнализации ОЗЗ состоит из трёх программных компонентов (рис. 5):

- программы, работающей в процессоре DSP/OMAPL137, выполняющей чтение информации с АЦП и вычисление взаимной корреляции между каналами;
- программы, работающей в процессоре ARM/OMAPL137, основной задачей которой является прием и обработка команд от клиентского приложения;
- клиентского приложения QtOZZ, выполняемого на персональном компьютере ПК2.

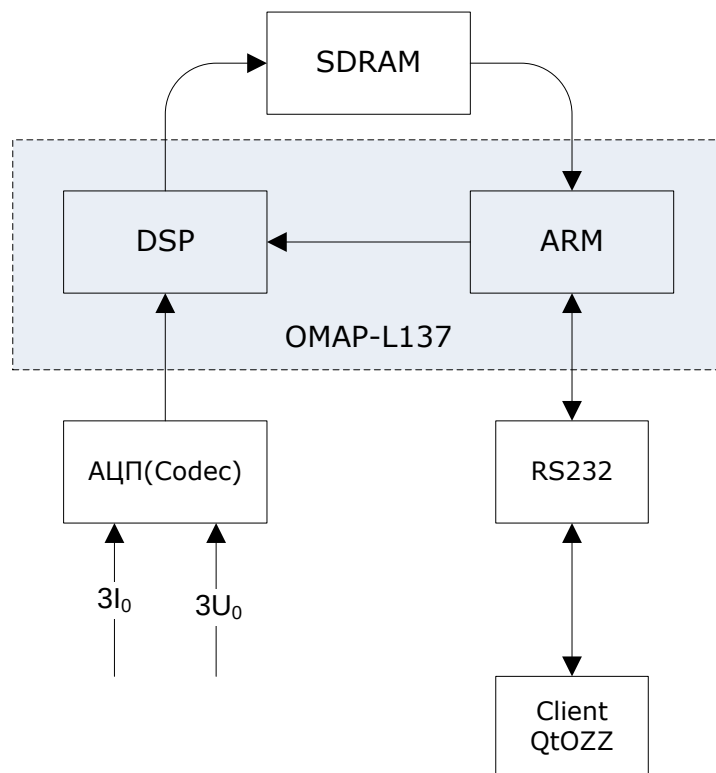


Рис. 5: Структура программного обеспечения отладочного прототипа устройства защиты от ОЗЗ

ПО отладочного прототипа устройства сигнализации ОЗЗ реализует следующие режимы:

1. Режим измерения и отображения взаимно-корреляционной функции. Этот режим измерений используется для настройки порога при определении импульсов ОЗЗ.
2. Режим измерения числа пробоев изоляции при ОЗЗ. Этот режим измерений используется для подсчета числа пробоев изоляции ОЗЗ в единицу времени.

Алгоритм работы ПО в режиме 1 следующий:

1. Клиентское приложение передает в процессор ARM команду на старт измерений
2. Процессор ARM транслирует команду старта в DSP и переходит в состояние ожидания готовности данных.

3. DSP запускает кодек на измерения, читает данные с двух каналов АЦП (левый канал – $3i_0(t)$, правый – $3u_0(t)$) и записывает их в кольцевой буфер.
4. Как только данных достаточно, DSP рассчитывает корреляционную точку и продолжает чтение данных с АЦП.
5. Когда количество корреляционных точек достигает заданного значения (8192 точки), DSP выставляет флаг готовности и переходит в ожидание следующей команды.
6. Получив флаг готовности, ARM передает весь массив корреляционных точек в клиентское приложение.
7. Клиентское приложение обрабатывает полученный массив корреляционных данных: подсчитывается количество корреляционных импульсов путем поточечного сравнения данных с порогом, число импульсов отображается.
8. Весь процесс измерений повторяется, начиная с п. 1.

В режиме 2 ПО реализует следующий алгоритм работы:

1. Клиентское приложение передает в процессор ARM команду на старт измерений и запускает таймер.
2. Процессор ARM транслирует команду старта в DSP и переходит в состояние ожидания команды от готовности данных.
3. DSP запускает АЦП на измерения, читает преобразованные данные с двух каналов (1-й канал – $3i_0(t)$, 2-й канал – $3u_0(t)$) и записывает их в кольцевой буфер.
4. Как только данных достаточно DSP рассчитывает корреляционную точку и сравнивает ее значение с установленным порогом. Если значение корреляции больше порога заданного знака, значение счетчика импульсов увеличивается на единицу и DSP продолжает чтение данных с АЦП.
5. Получив команду от клиентского приложения на чтение счетчика, ARM передает его значение в клиентское приложение и сбрасывает счетчик в нулевое состояние.
6. Клиентское приложение отображает число импульсов.
7. Весь процесс измерений повторяется, начиная с п. 4.

Таким образом, испытательный комплекс реализует следующие основные функции:

- непрерывное вычисление взаимно-корреляционной функции заданной длины между каналами $3i_0(t)$ и $d3u_0(t)/dt$;
- сравнение полученной величины взаимно-корреляционной функции с установленным значением;
- непрерывный подсчет количества однократных или повторяющихся ОЗЗ за установленный временной интервал;
- сравнение полученной величины числа импульсов с установленным значением.
- отображение полученных результатов на экране монитора ПК2.

Проведенные испытания с использованием тестовых сигналов, соответствующих различным разновидностям внутренних и внешних ОЗЗ, подтвердили работоспособность устройства защиты от ОЗЗ, выполненного по способу [4]

Испытания опытного образца устройства защиты от ОЗЗ по способу [4] на физической модели электрической кабельной сети 6 кВ. Структурная схема испытаний опытного образца устройства защиты от ОЗЗ на физической модели кабельной сети 6 кВ приведена на рис. 6.

Физическая модель радиальной трехфазной электрической сети выполнена на напряжении 220 В и содержит несколько трехфазных кабельных линий, выполненных в виде цепочечных схем из трехфазных блоков для учета распределенного характера их параметров. На кабельных линиях установлены ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗРЛ. Для получения бросков переходных токов, близких по амплитуде к броскам переходных токов при ОЗЗ в реальных сетях использовалось увеличенное число витков первичной обмотки ТТНП. В процессе испытаний на физической модели кабельной сети 6 кВ имитировались внутренние и внешние однократные, перемежающиеся и устойчивые ОЗЗ (ОЗЗ-1 и ОЗЗ-2, рис. 6).

Испытания опытного на физической модели кабельной сети, т.е. в условиях функционирования, близких к условиям в реальных сетях, подтвердили высокую работоспособность и высокую эффективность функционирования при внутренних и внешних повреждениях разработанных алгоритмов функционирования защиты от ОЗЗ по способу [4] и реализующего эти алгоритмы программного обеспечения.

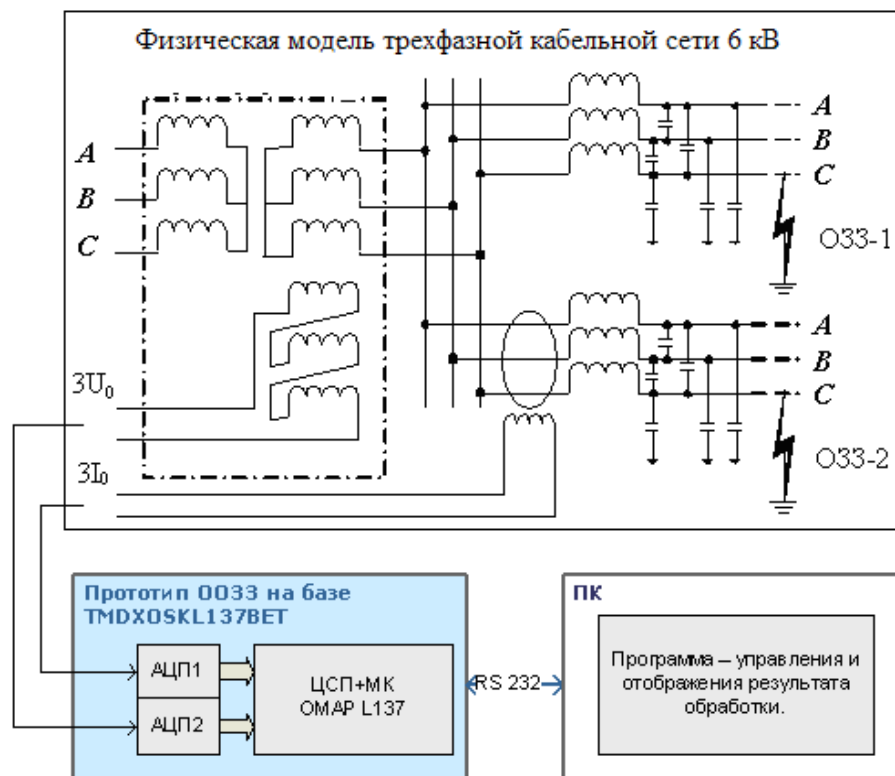


Рис. 6: Структурная схема испытаний опытного образца устройства защиты от ОЗЗ по способу [4] на физической модели трехфазной кабельной сети 6 кВ

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Технически наиболее совершенное решение в части устройств защиты и селективной сигнализации ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, прежде всего, работающих с резонансным заземлением нейтрали через ДГР, позволяют получить направленные комбинированные устройства, основанные на использовании фазовых соотношений электрических величин переходного процесса и установившегося режима замыкания на землю.
2. Наиболее эффективным по соотношению сигнал/помеха способом выполнения направленной защиты от ОЗЗ, реагирующей на переходный процесс, является способ, основанный на вычислении временной взаимной корреляционной функции совокупности мгновенных значений тока нулевой последовательности и скорости нарастания (производной) напряжения нулевой последовательности.
3. Испытания разработанного опытного образца микропроцессорной защиты от ОЗЗ по способу п. 2., выполненные с использованием тестовых сигналов токов и напряжения нулевой последовательности при различных разновидностях ОЗЗ (однократных пробоях, неустойчивых дуговых и устойчивых повреждениях), полученных в системе моделирования Matlab, а также на физической модели трехфазной кабельной сети подтвердили работоспособность и высокую эффективность ее функционирования

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.
- [2] Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3-35 кВ / Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: ВНИИЭ, 1994.

- [3] Шалыт Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – С. 77 – 97.
- [4] Патент на изобретение № 2402131 (РФ). Способ диагностики и направленной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях / А.Л.Куликов, В.А.Шуин., А.А.Петрухин. – Приоритет изобретения от 03.08.2009 г.
- [5] Лачугин В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю // Энергетик. – 1997, № 9. С. 21.