

А. Р. Григорьян, Н. М. Богатов

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ  
В ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ  
ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

L. R. Grigor'yan, N. M. Bogatov

APPLICATION OF PHASE METHODS IN IDENTIFICATION  
OF PLACES OF DAMAGE TO INSULATION COATING  
OF PIPELINES

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Содержание данной работы определяется актуальностью диагностики изоляционного покрытия трубопроводов. Предметом исследования являются фазовые методы идентификации мест повреждения изоляции трубопроводов с использованием контактных и бесконтактных способов съема поверхностных потенциалов грунта. **Материалы и методы.** Отличительной особенностью предложенных фазовых методов является применение ключевых синхронных детекторов, выходной сигнал которых определяется амплитудными и фазовыми параметрами контролируемых сигналов. Для решения проблемы измерения фазовых параметров сигналов с пространственно разнесенных по длине трубопровода генератора и приемника предложено использовать квадратурные синхронные детекторы, синхронизированные сигналами Глонасс/GPS. **Результаты.** Предложенная методика позволила решить проблему временной синхронизации, используя «технологический прием» измерения фазы выходного сигнала генератора в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку фазовых параметров осуществить, используя широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку испытательных сигналов. **Выводы.** Предложенное аппаратно-технологическое решение позволило решить проблему фазовой идентификации мест повреждения изоляционного покрытия с разнесенных в пространстве объектов.

**A b s t r a c t. Background.** The content of this work is explained by the relevance of the diagnostics of the insulation coating of pipelines. The subject of the study is the phase methods for identifying places of damage to the insulation of pipelines using contact and non-contact methods for removing surface potentials of the soil. **Materials and methods.** A distinctive feature of the proposed phase methods is the use of key synchronous detectors, the output signal of which is determined by the amplitude and phase parameters of the monitored signals. To solve the problem of measuring the phase parameters of signals spatially spaced along the generator and receiver pipelines, it is proposed to use synchronous quadrature detectors synchronized with Glonass / GPS signals. **Results.** The proposed methodology made it possible to solve the problem of time synchronization using a “technological technique” for measuring the phase of the generator output signal at the starting point of the pipeline under investigation, and to evaluate the phase parameters using broadband and noise-resistant optimal correlation processing of test signals. **Conclusions.** The proposed hardware and technological solution allowed us to solve the problem of phase identification of places of damage to the insulation coating from objects spaced apart in space.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** трубопроводы, схемотехника, измерители, фаза, место повреждения, переходные процессы, время распространения.

**К e y w o r d s:** pipelines, circuitry, meters, phase, place of damage, transients, propagation time.

### *Введение*

В соответствии с нормативными документами [1] в практике электрохимической защиты трубопроводов применяются две основные процедуры:

- измерение параметров, характеризующих эффективность электрохимической защиты;
- электрометрическая диагностика и идентификация мест повреждения трубопроводов.

В качестве основных параметров, характеризующих коррозионную защищенность трубопроводов, признаны: поляризационный потенциал, сопротивление изоляционного покрытия и растекание тока, а также удельное сопротивление и инометрические показатели грунта [2].

Измерение вышеприведенных параметров позволяет получить интегральную оценку коррозионной защищенности подземных коммуникаций. Не менее важно также идентифицировать конкретное место повреждения их изоляции, что особенно актуально с учетом фактора масштабности объектов исследования и экономико-экологических факторов при возникновении кризисных состояний.

В практике электрометрической диагностики инженерных коммуникаций используются как контактные методы измерения поверхностных потенциалов грунта, так и бесконтактные индукционные методы измерения амплитудных параметров тестового сигнала. Недостатком обоих методов является использование амплитудных параметров, которые менее помехоустойчивые, что не обеспечивает необходимой достоверности в фиксации дефектов в изоляционном покрытии подземных коммуникаций.

Радикально решить эту проблему возможно при переходе к фазовой идентификации мест повреждения при представлении трубопровода как искусственной линии связи [3].

В данной работе рассмотрены способы аппаратной реализации диагностики подземных коммуникаций, область и эффективность их применения.

### *Аппаратура диагностического обследования*

В общем случае измерительный комплекс включает трассопоисковый генератор, осуществляющий необходимое тестовое воздействие на исследуемый объект и трассопоисковый приемник, анализирующий информативные параметры тестового сигнала при его прохождении по исследуемому объекту. Наиболее значимыми параметрами генератора являются: частота генерируемых гармонических сигналов в диапазоне от инфранизких (единицы герц) до низких (до 10 кГц) частот, а также выходная мощность (до 500 Вт) и величина тестового тока (до 25 А), т.е. параметры, характеризующие основное его предназначение. Частотные параметры позволяют реализовать наиболее эффективные способы диагностики подземных коммуникаций, а мощностные – проводить анализ по всей длине контролируемого участка между двумя станциями катодной защиты.

Наряду с применением генераторов с питанием от сети 220 В применяются также генераторы с аккумуляторным питанием, подключаемые к трубопроводу через контрольно-измерительные пункты. Мощность таких генераторов составляет от 3 до 10 Вт, а длина контролируемого участка не превышает 1÷2 км. Схемотехника генераторов довольно разнообразна и подробно рассмотрена в работах [4–6].

В отношении параметров трассопоисковых приемников необходимо отметить, что они должны обеспечивать предельную чувствительность и избирательность в процессе усиления тестового сигнала, а также необходимую линейность при его детектировании во всем динамическом диапазоне.

Схемотехника приемников во многом определяется используемым способом диагностики изоляционного покрытия трубопроводов. Вот почему детальный анализ структуры приемников рассмотрим в контексте применяемых методов поиска повреждения изоляционного покрытия трубопроводов.

## Методы диагностики повреждения трубопроводов

Съем информации с исследуемого подземного трубопровода производится с поверхности земли и осуществляется контактными методами, анализирующими электрические параметры, и бесконтактными методами, анализирующими магнитные параметры электромагнитного поля, наведенного протекающим по трубопроводу тестовым током.

Наиболее распространенными контактными методами являются метод «интенсивных измерений» и метод Пирсона.

Суть метода «интенсивных измерений» заключается в измерении вдоль трассы трубопровода через каждые 3–5 м поверхностных потенциалов труба-земля и горизонтальных градиентов напряжения как при включенной, так и при отключенной внешней поляризации.

Последовательно измеряя указанные потенциалы согласно рис. 1, определяют истинное значение защитного потенциала труба-земля по формуле [7]

$$U_3 = U_{\text{отк}} - \frac{U_{\Gamma \text{отк}}}{U_{\Gamma \text{вкл}} - U_{\Gamma \text{отк}}} (U_{\text{вкл}} - U_{\text{отк}}), \quad (1)$$

где  $U_3$  – истинное значение потенциала труба-земля;  $U_{\text{вкл}}$ ,  $U_{\text{отк}}$  – измеренные на поверхности потенциалы соответственно при включенной и отключенной установке катодной защиты;  $U_{\Gamma \text{вкл}}$ ,  $U_{\Gamma \text{отк}}$  – горизонтальные градиенты напряжения при включенной и отключенной поляризации.

Измеренные значения фиксируются в переносном компьютере с последующей математической обработкой в стационарных условиях с представлением результатов в виде графиков или таблиц. Трудоемкость и себестоимость данного метода очевидна и определяется как числом операторов (не менее трех), так и необходимостью дополнительного оборудования для периодического прерывания тока поляризации станции катодной защиты. Вот почему его применение целесообразно лишь на особо опасных в коррозионном отношении участках трассы.

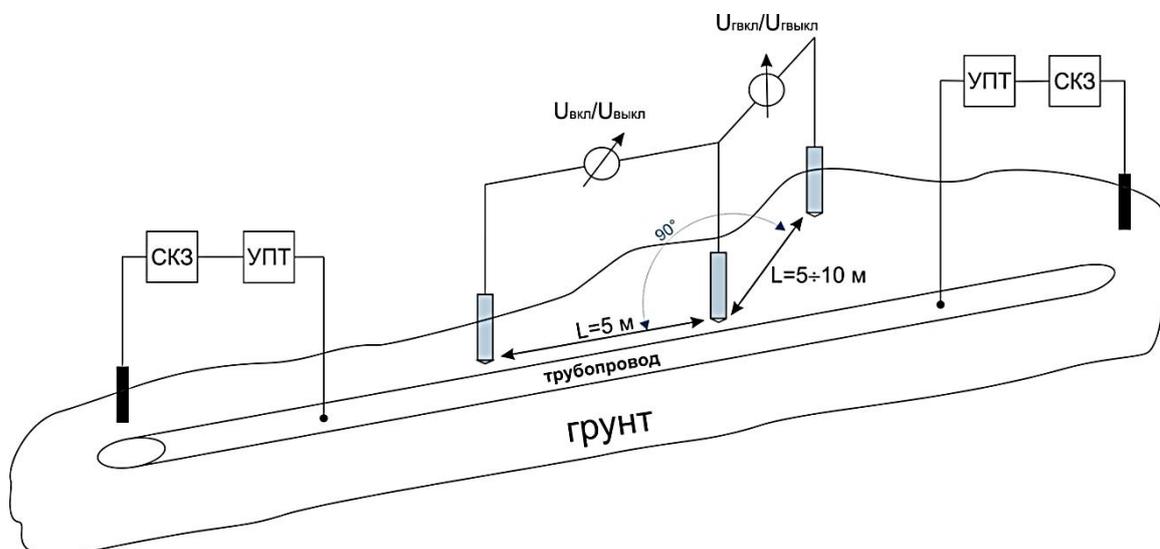


Рис. 1. Схема «интенсивных измерений»

Метод Пирсона наиболее известен и распространен среди способов диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов [8]. Он основан на измерении градиентов потенциалов (разности уровней сигналов) на поверхности земли между двумя перемещаемыми вдоль трубопровода стальными контактными электродами. Для этого два оператора движутся вдоль трубопровода один за другим, причем каждый из них поддерживает, по крайней мере, один из своих металлических контактных электродов в постоянном контакте с землей. Кабели, подсоединенные к контактным электродам, определяют расстояние между операторами (примерно 8–10 м). При прохождении первого оператора над дефектом наблюдается повышение уровня сигнала. Как только первый оператор удаляется от дефекта, уровень сигнала

уменьшается и затем снова увеличивается, как только второй оператор проходит над дефектом. Интервал между пиками уровня сигнала соответствует расстоянию между двумя операторами, и в его же пределах располагается дефект изоляционного покрытия трубопровода [9].

Эффективность метода Пирсона определяется точностью измерения градиентов потенциалов на поверхности земли и обусловлена чувствительностью используемого трассопоискового дифференциального приемника [10]. Порог чувствительности дифференциальных приемников с использованием амплитудного детектирования сигналов не может быть меньше 10–20 мВ [11].

Повысить точность измерения градиентов потенциалов дифференциальным приемником на поверхности земли возможно при применении ключевого синхронного детектирования сигналов, что позволяет детектировать малые сигналы в микровольтовом диапазоне и одновременно повысить избирательность измерения градиентов потенциалов.

Для этого измерение градиентов потенциалов вдоль трубопровода осуществляют при одновременном бесконтактном индукционном измерении уровней сигналов, и после ограничения их по амплитуде используют в качестве опорных для ключевого синхронного детектирования сигналов с контактных электродов. При этом введение бесконтактного индукционного измерения сигналов позволяет одновременно проводить фазовую идентификацию дефектов изоляционного покрытия трубопроводов [12].

На рис. 2 представлена функциональная схема устройства диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов.

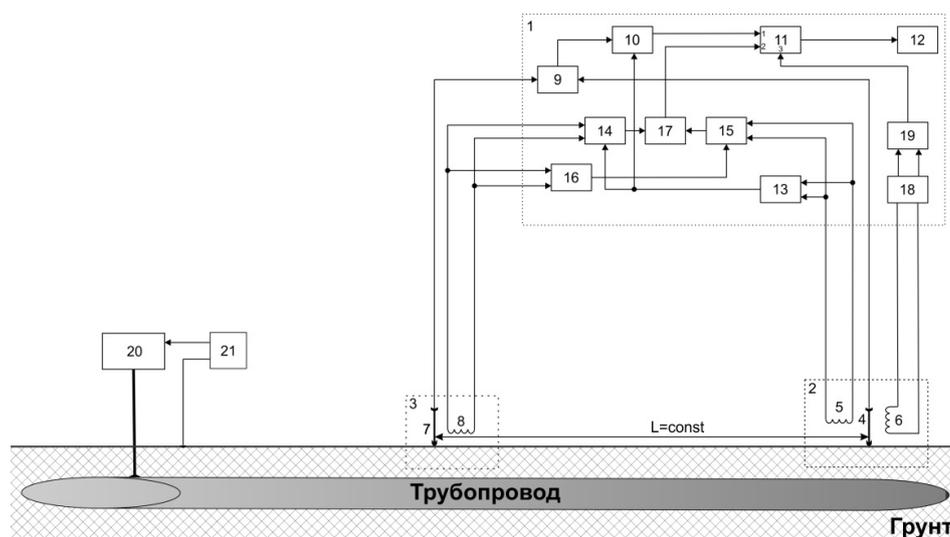


Рис. 2. Функциональная схема устройства диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов

Диагностику дефектов изоляционного покрытия трубопроводов осуществляют следующим образом. Предварительно к исследуемому трубопроводу на контрольно-измерительном пункте 20 подключают трассопоисковый генератор 21 с установленными значениями по частоте и мощности сигнала. Далее оба оператора подсоединяют к датчикам 2 и 3 соответствующие кабели, длина которых определяет расстояние между операторами и в процессе движения вдоль трассы остается постоянной  $L = \text{const}$ . Первый оператор задает темп и несет трассопоисковый приемник 1. Для поиска трассы (трубопровода) и определения осевой линии трубопровода используют антенну 6, сигнал с которой через избирательный усилитель 18 и детектор 19 поступает на третий аналоговый вход микроконтроллера 11, который выводит на графическом дисплее 12 информацию оператору о его положении относительно осевой линии трубопровода, что позволяет производить все измерения непосредственно над осевой линией трубопровода.

В процессе движения над осевой линией трубопровода дефект в изоляции трубопровода обнаруживают по увеличению уровней сигналов на первом и втором аналоговых входах микроконтроллера 11 с блоков амплитудной и фазовой идентификации трассопоискового приемника 1.

Амплитудную идентификацию дефекта в изоляции трубопровода осуществляют путем сравнения дифференциальных приемников 9 уровней выходных сигналов с контактными электродами 4 и 7 датчиков 2 и 3 соответственно первого и второго операторов с последующим ключевым детектированием его выходного напряжения синхронным детектором 10, опорным сигналом для которого после ограничения по уровню усилителем-ограничителем 13 является сигнал с горизонтальной индукционной антенны 5 датчика 2 первого оператора трассопоискового приемника 1. При амплитудной идентификации разностный выходной сигнал синхронного детектора 10 определяют из формулы (1) и при наличии дефекта наблюдают увеличение его уровня:

$$\Delta U_{\text{сд1}} = K_{\text{дв1}} K_{\text{сд1}} (U_{\text{a1}} - U_{\text{a2}}), \quad (2)$$

где  $U_{\text{a1}}, U_{\text{a2}}$  – амплитудные значения сигналов  $u_{\text{к1}}(t) = U_{\text{a1}} \cos \omega t$ ,  $u_{\text{к2}}(t) = U_{\text{a2}} \cos \omega t$  с контактных электродов 4 и 7;  $K_{\text{дв1}}, K_{\text{сд1}}$  – коэффициенты усиления первого дифференциального усилителя 9 и первого синхронного детектора 10 соответственно;  $\omega$  – частота сигнала генератора 21.

Фазовую идентификацию дефекта в изоляции трубопровода осуществляют путем сравнения дифференциальным усилителем 17 выходных сигналов с синхронных детекторов 15 и 14, опорными сигналами для которых являются сигналы с горизонтальных индукционных антенн 5 и 8, ограниченных по уровню усилителями-ограничителями 13 и 16 соответственно. При этом входными сигналами синхронных детекторов 15 и 14 являются выходные сигналы горизонтальных антенн 5 и 8 с датчиков 2 и 3 первого и второго операторов соответственно.

При наличии дефекта в изоляции трубопровода сигналы с горизонтальных индукционных антенн 5 и 8 в момент времени  $t_i$  определяют соответственно из выражений

$$U_1(t_i) = (U_i + \Delta U_i) \cos(\varphi_i + \Delta \varphi_i), \quad (3)$$

$$U_2(t_i) = U_i \cos \varphi_i, \quad (4)$$

где  $\Delta \varphi_i$  и  $\Delta U_i$  – скачок фазы и амплитуды в горизонтальной индукционной антенне 5, вызванный дефектом изоляционного покрытия трубопровода в  $i$  точке измерения;  $U_i$  и  $\varphi_i$  – фаза и амплитуда сигнала в горизонтальной индукционной антенне датчиков;  $\varphi_i = \omega t_i$ .

Выходные напряжения в момент времени  $t_i$  второго 14 и третьего 15 синхронных детекторов определяют из выражений

$$U_{\text{сд2}} = K_{\text{сд2}} (U_i + \Delta U_i) \cos \Delta \varphi_i, \quad (5)$$

$$U_{\text{сд3}} = K_{\text{сд3}} U_i \cos \Delta \varphi_i, \quad (6)$$

где  $K_{\text{сд2}}, K_{\text{сд3}}$  – коэффициенты передачи второго 14 и третьего 15 синхронных детекторов соответственно.

Следовательно, выходной разностный сигнал дифференциального усилителя 17 при  $K_{\text{сд2}} \cong K_{\text{сд3}} \cong K_{\text{сд}}$  будет равен

$$\Delta U_{\text{дв2}} = K_{\text{сд}} K_{\text{дв2}} \Delta U_i \cos \Delta \varphi_i, \quad (7)$$

где  $K_{\text{дв2}}$  – коэффициент передачи дифференциального усилителя 17.

Микроконтроллер 11 преобразует аналоговые сигналы с первого синхронного детектора 10 и второго дифференциального усилителя 17 в цифровой сигнал с последующим выводом на графический дисплей 12. При этом на графическом дисплее 12 отражается информация, характеризующая как амплитудную (сигналы с контактных электродов 4 и 7), так и фазовую (сигналы с бесконтактных индукционных горизонтальных антенн 5 и 8) идентификацию состояния изоляционного покрытия.

Из анализа модифицированного метода Пирсона следует:

– дополнение контактного способа измерения сигналов бесконтактным позволило при измерениях градиентов потенциалов осуществить синхронное детектирование сравниваемых сигналов, используя в качестве опорного сигнал с горизонтальной индукционной антенны первого оператора трассопоискового приемника;

– предложенное техническое решение идентификации дефектов позволяет одновременно с амплитудной проводить дополнительно высокочувствительную фазовую идентификацию, что, в целом, значительно повышает точность идентификации мест повреждения в изоляционном покрытии трубопроводов;

– с учетом того, что чувствительность синхронных детекторов находится в микровольтовом диапазоне, предлагаемый метод измерения потенциалов позволяет идентифицировать самые незначительные дефекты в изоляционном покрытии трубопроводов.

Рассмотрим далее бесконтактные индукционные методы. Наиболее производительным является метод интегральной оценки состояния изоляционного покрытия трубопроводов [13]. Согласно этому методу, к трубопроводу подключают генератор сигналов в контрольно-измерительном пункте. После определения осевой линии трубопровода измеряют величину напряжения сигналов в  $i$ -й точке, значение которого корректируют с учетом глубины трубопровода в данной точке. Далее измерение величины напряжения сигнала повторяют в  $i+1$  точке трубопровода, отдаленной от  $i$  точки на расстояние  $L$ , составляющее несколько сот метров. Разница двух значений напряжений относится к расстоянию  $L$ , определяют величину затухания сигнала между двумя точками измерения. По относительному значению затухания с учетом частоты генератора из приведенных в работе [13] таблиц определяют состояние изоляционного покрытия трубопровода. Достоинством метода является сравнительная простота его реализации, а недостатком – невозможность идентифицировать конкретное место повреждения изоляционного покрытия трубопровода. Для решения этой проблемы в настоящее время применяется амплитудный анализ протекающего по трубопроводу испытательного сигнала, по характеру поведения которого диагностируют дефекты в изоляционном покрытии трубопроводов. Однако использование амплитудного анализа испытательных сигналов при всей простоте его реализации не обеспечивает необходимой достоверности в фиксации дефектов изоляционного покрытия трубопроводов.

Решение этой проблемы возможно на основе анализа фазовых параметров испытательных сигналов с представлением трубопровода как искусственной линии связи. Однако практическая реализация фазового метода затруднена из-за пространственного разнесения по длине трубопровода генератора и приемника, разность фаз между выходными сигналами генератора (опорным сигналом) и входным сигналом приемника (измерительный сигнал) является исследуемым фазовым параметром.

Для решения этой проблемы предложено два способа [14, 15]. Оба основаны на применении спутниковой системы Глонасс/GPS для временной синхронизации разнесенных в пространстве объектов (генератора и приемника). Различия заключаются в структуре фазовых приемников:

– первый способ измерения фазы выходных сигналов генератора и приемника осуществляется векторными вольтметрами по трем выборкам за период исследуемых сигналов с передачей измеренных значений по радиоканалу;

– второй – с использованием квадратурных синхронных детекторов, синхронизированных сигналами Глонасс/GPS, что позволило заменить передачу сравниваемых параметров по радиоканалу на «технологический прием» измерение фазы  $\varphi_r$  выходного сигнала генератора трассопоисковым приемником в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку параметров сигналов по дискретным выборкам заменить на широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку сигналов [16].

Структурная схема предлагаемого измерительного комплекса представлены на рис. 3. Измерительный комплекс состоит из трассопоискового генератора 1 и приемника 2.

Трассопоисковый генератор 1 осуществляет запитку исследуемого трубопровода. Тактовые импульсы с Глонасс/GPS приемника 3 с частотой равной 1 Гц поступают в микроконтроллер 4, осуществляющий временную синхронизацию генератора 5. Это означает, что выходной сигнал с усилителя мощности 6 трассопоискового генератора 1, фаза которого

в этом случае жестко привязана к тактовым импульсам Глонасс/GPS приемника 3, может быть использован в измерительном комплексе в качестве опорного, так как его фаза не меняется.

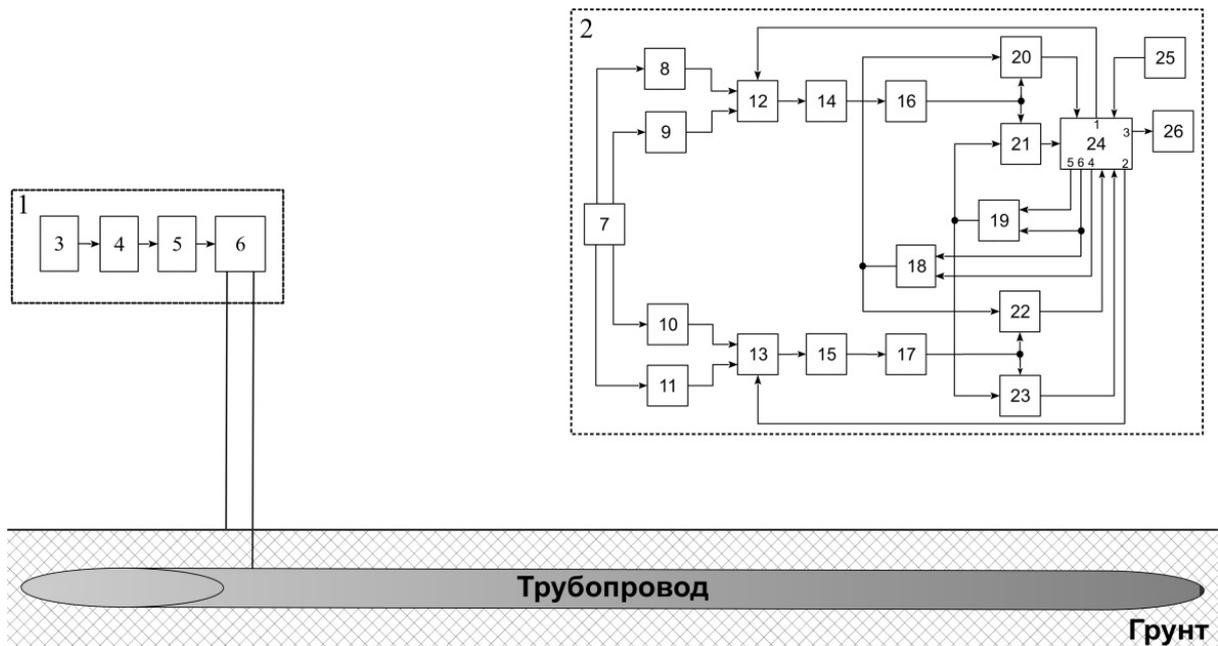


Рис. 3. Структурная схема комплекса

Это осуществляется путем измерения фазы  $\varphi_r$  выходного сигнала трассопоискового генератора 1 трассопоисковым приемником 2 в начальной точке обследуемого трубопровода и фиксируется (запоминается) в микроконтроллере 24 трассопоисковым приемником 2.

Для этого трассопоисковым приемником 2 измеряют фазу  $\varphi_r$  выходного сигнала в начальной точке обследуемого трубопровода и фиксируют в микроконтроллере 24 трассопоискового приемника 2.

Цикл генерации трассопоискового генератора 1  $T_{\text{ц}} = 1$  с начинается по поступлению в микроконтроллер 4 синхронизирующих тактовых импульсов с Глонасс/GPS приемника 3. Поэтому собственная нестабильность частоты задающего генератора 5, а также не кратность периода сигнала к циклу измерения не оказывают влияния на стабильность фазы выходного опорного сигнала трассопоискового генератора 1, а следовательно, и на точность процесса фазовой идентификации измерительным комплексом.

В трассопоисковом приемнике 2 при поиске места повреждения трубопровода выходные сигналы индукционных преобразователей антенного блока 7 поступают на преобразователи напряжение-ток 8, 9, 10, 11, обеспечивающие усиление сигнала, коммутаторы сигналов 12 и 13, коммутирующие их, и подают на фильтры 14 и 15, а затем происходит их масштабирование масштабирующими преобразователями 16 и 17. К выходу первого масштабирующего преобразователя 16 подключены объединенные входы первого и второго синхронных детекторов 20 и 21, на которые подаются опорные сигналы, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  с первого 18 и второго 19 DDS генераторов, параметры которых (частота, фаза) управляются и синхронизируются от микроконтроллера 24 трассопоискового приемника 2. Выходные сигналы с первого 20 и второго 21 синхронных детекторов поступают на измерительные входы микроконтроллера 24, где вычисляют амплитуду и фазу выходного сигнала первого масштабного преобразователя 16 по формулам:

$$U_{\text{МП}} = \sqrt{U_{\text{сд1}}^2 + U_{\text{сд2}}^2} = \sqrt{[U_{\text{МП}} \cos \varphi]^2 + [U_{\text{МП}} \sin \varphi]^2}, \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{МП}} = 0,5 \left[ \arccos \frac{U_{\text{сд1}}}{U_{\text{МП}}} + \arcsin \frac{U_{\text{сд2}}}{U_{\text{МП}}} \right], \quad (9)$$

где  $\varphi_{\text{МП}}$  – фаза первого масштабирующего преобразователя 16;  $U_{\text{МП}}$  – напряжение первого масштабирующего преобразователя 16;  $U_{\text{СД1}} = U_{\text{МП}} \cos \varphi$  – напряжение с первого синхронного детектора 20;  $U_{\text{СД2}} = U_{\text{МП}} \sin \varphi$  – напряжение со второго синхронного детектора 21.

Из анализа формул (8) и (9) следует, что при использовании синхронных детекторов 20 и 21 (первый квадратурный фазовый детектор), фазовое рассогласование между опорными сигналами синхронных детекторов 20 и 21 и сигнала с масштабирующего преобразователя 16 не влияет на точность измерения его амплитудных и фазовых параметров. При этом каждый цикл измерения  $T_{\text{ц}} = 1$  с так же, как в трассопоисковом генераторе 1, начинается по поступлению в микроконтроллер 24 синхронизирующих тактовых импульсов с Глонасс/GPS приемника 25. Поэтому собственная нестабильность частоты генераторов квадратурных сигналов (DDS генераторов 18 и 19) не оказывает никакого влияния на точность процесса измерения фазы.

Сравнивая фазу  $\varphi_{\Gamma}$ , зафиксированную в трассопоисковом приемнике 2 в начальной точке обследования трубопровода, с текущими значениями  $\varphi_{\text{МП}}$ , определяем разность фаз

$$\Delta\varphi = \varphi_{\Gamma} - \varphi_{\text{МП}}. \quad (10)$$

Очевидно, что значение  $\Delta\varphi$  определяется временем распространения сигнала в исследуемом трубопроводе. В местах нарушения изоляции линейный характер изменения фазы прерывается и происходит ее скачок, который можно использовать для идентификации мест повреждения изоляции исследуемого объекта.

Важно подчеркнуть, что поскольку измерение как амплитудных, так и фазовых параметров сигналов происходит синхронно, то в моменты скачка фазы происходит также скачок тока, протекающего по объекту, что обеспечивает полную корреляцию процессов фазовой и амплитудной идентификации, а значит, увеличивает достоверность обнаружения мест повреждения изоляции исследуемого трубопровода. При этом относительная погрешность измерения разности фаз определяется только временем рассогласования тактовых секундных импульсов, поступающих с Глонасс/GPS приемников 3 и 25 соответственно в микроконтроллеры 4 и 24 трассопоисковых генератора 1 и приемника 2. С учетом, что расстояние между трассопоисковым генератором 1 и приемником 2 не превышает нескольких километров, то нестабильность тактовых импульсов определяется только инструментальной погрешностью Глонасс/GPS приемников 3 и 25, которая не превышает  $\pm 50$  нс. При частоте сигнала 975 Гц фазовая погрешность  $\Delta\varphi$  составляет  $\pm 0,02^\circ$ . Столь малая относительная погрешность позволяет использовать фазовый метод также для отсчета расстояния от точки привязки трассопоискового генератора до места повреждения изоляции, что, по сравнению с маркероискателями, значительно упрощает обозначение и повторный поиск дефектов исследуемого объекта, так как в этом случае не надо закапывать маркер для последующего его поиска. Достаточно только зафиксировать расстояние от места подключения трассопоискового генератора до места обнаружения дефекта (осуществляется автоматически) и сделать отметку в соответствующей документации. Погрешность обозначения дефектов на местности, с учетом линейного характера изменения фазы, определяется формулой

$$\Delta L_x = \frac{L_{\text{max}} \Delta\varphi}{360^\circ}, \quad (11)$$

где  $L_{\text{max}}$  – максимальное расстояние между пунктами подключения трассопоискового генератора.

Учитывая, что  $L_{\text{max}}$  не превышает нескольких километров, погрешность идентификации  $\Delta L_x$  не превышает 10–20 см. Это означает, что влияние погрешности  $\Delta\varphi$  практически не сказывается на точности идентификации мест повреждения исследуемого трубопровода.

### Заключение

1. В работе рассмотрены, защищенные патентами РФ, методы электрометрической диагностики изоляционного покрытия трубопроводов, с использованием контактных и бесконтактных способов съема поверхностных потенциалов грунта.

2. Отличительной особенностью предложенных фазовых методов идентификации мест повреждения является применение ключевых синхронных детекторов, выходной сигнал которых определяется как амплитудными, так и фазовыми параметрами контролируемых испытательных сигналов. Такая полная корреляция измеряемых фазовых и амплитудных параметров повышает достоверность идентификации мест повреждения изоляционного покрытия трубопроводов.

3. Проблему пространственно разнесенных по длине трубопроводов генератора и приемника предложено решить с использованием квадратурных синхронных детекторов, синхронизированных сигналами Глонасс/GPS, что позволило применить «технологический прием» измерения фазы  $\varphi_r$  выходного сигнала генератора в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку параметров осуществить, используя широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку испытательных сигналов.

### Библиографический список

1. ГОСТ Р54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – Москва, 2011.
2. СТО РД Газпром 39-1.10-088–2004. – Москва, 2004.
3. Сергованцев, В. Т. Газопровод как канал связи в системах телемеханики / В. Т. Сергованцев, В. А. Артемов, К. А. Канев. – Москва : Недры, 1984. – С. 6–15.
4. Пат. РФ 2413354. Двухканальный генератор гармонических сигналов / Григорьян Л. Р. ; зарег. 27.02.2011.
5. Пат. РФ 2463629. Трассопоисковый генератор сигналов / Богатов Н. М., Григорьян Л. Р., Митина О. Е., Сахно М. А. ; зарег. 10.10.2012.
6. Пат. РФ 175483. Трассопоисковый генератор сигналов / Богатов Н. М., Григорьян Л. Р. ; зарег. 06.12.2017.
7. Fischer, W. Probleme der IR-freien Potentialmessung in Gegenwart von Ausgleichsströmen / W. Fischer, H. Hildebrand, W. Prinz, W. Schwenk // Wertstoffe und Korrosionen. – 1988. – № 39. – P. 18–22.
8. Pearson, K. On the criterion that a given system of deviation from the problem in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling / K. Pearson // Philosophical Magazine Series. – 1900. – Ser. 5, vol. 50, iss. 302. – P. 157–175.
9. Глазков, В. И. Электрический метод нахождения сквозных повреждений в изоляционных покрытиях действующих магистральных трубопроводов / В. И. Глазков // Защита металлов. – 1965. – № 2. – С. 21.
10. Цнев, А. Н. Поиск повреждений изоляционных покрытий магистральных газопроводов без вскрытия в зоне постоянного действия блуждающих токов / А. Н. Цнев, В. В. Носов, М. Н. Назарова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4 (5-2). – С. 430–438.
11. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – Москва : Додэка-XXI, 2015. – 528 с.
12. Заявка на изобретение № 2019120637 Способ измерения сопротивления изоляционного покрытия трубопровода / Григорьян Л. Р. ; заявл. 03.07.2019.
13. ВРД-39-1.10-026-2001. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов.
14. Пат. РФ 2414719. Измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций / Григорьян Л. Р. ; зарег. 20.03.2011.
15. Пат. РФ 2687236. Измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций / Григорьян Л. Р., Богатов Н. М. ; зарег. 08.05. 2019.
16. Фалькович, С. Е. Оценка параметров сигнала / С. Е. Фалькович. – Москва : Советское радио, 1970. – 336 с.

### References

1. GOST R54257–2010. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya i trebovaniya* [GOST R54257-2010. Reliability of building structures and foundations. Main provisions and requirements]. Moscow, 2011. [In Russian]
2. STO RD *Gazprom 39-1.10-088–2004*. Moscow, 2004. [In Russian]
3. Sergovantsev V. T., Artemov V. A., Kanev K. A. *Gazoprovod kak kanal svyazi v sistemakh telemekhaniki* [Gas pipeline as a communication channel in telemechanics systems]. Moscow: Nedry, 1984, pp. 6–15. [In Russian]
4. Pat. RF 2413354. *Dvukhkanal'nyy generator garmonicheskikh signalov* [Pat. RF 2413354. Two-channel harmonic signal generator]. Grigor'yan L. R.; reg. 27.02.2011. [In Russian]

5. Pat. RF 2463629. *Trassoposkovyy generator signalov* [Pat. RF 2463629. Traceroute signal generator]. Bogatov N. M., Grigor'yan L. R., Mitina O. E., Sakhno M. A.; reg. 10.10.2012. [In Russian]
6. Pat. RF 175483. *Trassoposkovyy generator signalov* [Pat. RF 175483. Traceroute signal generator]. Bogatov N. M., Grigor'yan L. R.; reg. 06.12.2017. [In Russian]
7. Fischer W., Hildebrand H., Prinz W., Schwenk W. *Wertstoffe und Korrosionen* [Materials and corrosion]. 1988, no. 39, pp. 18–22.
8. Pearson K. *Philosophical Magazine Series*. 1900, ser. 5, vol. 50, iss. 302, pp. 157–175.
9. Glazkov V. I. *Zashchita metallov* [Protection of metals]. 1965, no. 2, p. 21. [In Russian]
10. Tsenev A. N., Nosov V. V., Nazarova M. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin]. 2017, no. 4 (5-2), pp. 430–438. [In Russian]
11. Volovich G. I. *Skhemitekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* [Circuit design of analog and analog-to-digital electronic devices]. Moscow: Dodeka-XXI, 2015, 528 p. [In Russian]
12. *Zayavka na izobretenie № 2019120637 Sposob izmereniya soprotivleniya izolyatsionnogo pokrytiya truboprovoda* [Application for invention No. 2019120637 Method for measuring the resistance of the insulation coating of a pipeline]. Grigor'yan L. R.; appl. 03.07.2019. [In Russian]
13. VRD-39-1.10-026-2001. *Metodika otsenki fakticheskogo polozheniya i sostoyaniya podzemnykh truboprovodov* [VRD-39-1.10-026-2001. Methodology for assessing the actual position and condition of underground pipelines]. [In Russian]
14. Pat. RF 2414719. *Izmeritel'nyy kompleks dlya poiska i diagnostiki podzemnykh kommunikatsiy* [Pat. RF 2414719. Measuring complex for searching and diagnostics of underground communications]. Grigor'yan L. R.; reg. 20.03.2011. [In Russian]
15. Pat. RF 2687236. *Izmeritel'nyy kompleks dlya poiska i diagnostiki podzemnykh kommunikatsiy* [Pat. RF 2687236. Measuring complex for searching and diagnostics of underground communications]. Grigor'yan L. R., Bogatov N. M.; reg. 08.05. 2019. [In Russian]
16. Fal'kovich, S. E. *Otsenka parametrov signala* [Estimation of parameters of signal]. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 336 p. [In Russian]

---

**Григорьян Леонтий Рустемович**

кандидат физико-математических наук, доцент,  
кафедра физики и информационных систем,  
Кубанский государственный университет  
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)  
E-mail: leonmezon@mail.ru

**Grigor'yan Leontiy Rustemovich**

candidate of physical and mathematical sciences,  
associate professor,  
sub-department of physics and information systems,  
Kuban State University  
(149 Stavropol'skaya street, Krasnodar, Russia)

**Богатов Николай Маркович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой физики  
и информационных систем,  
Кубанский государственный университет  
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)  
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

**Bogatov Nikolay Markovich**

doctor of physical and mathematical sciences,  
professor,  
head of sub-department of physics  
and information systems,  
Kuban State University  
(149 Stavropol'skaya street, Krasnodar, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Григорьян, Л. Р. Применение фазовых методов в идентификации мест повреждения изоляционного покрытия трубопроводов / Л. Р. Григорьян, Н. М. Богатов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 48–57. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-6.