

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК: 004.94:621.315.1: 681.518.5

Г.Ш. Эралиева, eralieva.gulmira@mail.ru

Г.Н. Ниязова,

Ч.М. Бузурманкулова,

Ж. А. Сулайманова

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТА ОБРЫВА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРОВОДА НОВОГО ТИПА

В статье проведен анализ возможности идентификации места обрыва воздушной линии электропередачи, выполненной на основе провода нового типа (ПНТ). ПНТ конструктивно подобен обычному, алюминиевому неизолированному проводу для линий электропередачи, отличающемуся тем, что один из проводов токопроводящей жилы изолирован от остальных. Следовательно, ПНТ состоит из двух составляющих, силового и информационного проводов. В конце линии информационный провод (ИП) накоротко соединяется с силовым проводом (СП). Идентификацию участка, где произошёл обрыв провода ВЛ, предполагается реализовать по величине сигнала (значение разности потенциалов между СП и ИП или по характеру изменения этой разности потенциалов, связанного с переходным процессом в момент обрыва). Для обоснования этого положения построена компьютерная модель рассматриваемой задачи в среде Simulink/SimPowerSystems. Результаты моделирования показали работоспособность способа.

Ключевые слова: воздушные линии; способ обнаружения обрыва провода воздушной линии; переходный процесс; компьютерное моделирование; Simulink/SimPowerSystems; схема замещения.

Введение

В [1] проанализированы проблемы, возникающие при диагностировании и мониторинге линий электропередачи в Казахстане. При некоторых особенностях аналогичные проблемы возникают и в Кыргызской Республике (КР).

В КР большая часть линий электропередачи (ЛЭП) проложена в условиях высокогорья вне населённых пунктов и имеет значительную протяжённость. В таком же положении находятся и высоковольтные линии (ВЛ) 110 – 500 кВ, которые являются стратегическими для системы электроэнергетики Кыргызстана. Следовательно, аварии на них могут нанести ощутимый ущерб. К тому же длительные и частые аварии, включая распределительные воздушные линии 10 – 35 кВ, проложенные в сельских районах, приводят к серьёзным бытовым неудобствам населения и могут создать социальную напряжённость.

Как отмечено в [1 - 3], «...современный уровень развития программно-аппаратной автоматизации обеспечивает возможность создания систем дистанционного управления с передачей информации по радиоканалам, однако разработок в области создания распределённых систем передачи информации по высоковольтным линиям электропередачи нет. Для обеспечения непрерывного измерения состояния изоляции высоковольтных изоляторов и обледенения токоведущих проводов требуется разработка специализированных датчиков-индикаторов, ориентированных на применение в рамках существующих конструкций линий электропередачи...».

В данной работе предлагается способ идентификации места обрыва воздушных линий, выполненный на основе запатентованного в КР провода нового типа (ПНТ), который, по мнению авторов, мог бы решить некоторые задачи, рассмотренные в [1].

Постановка задачи 1

Рассмотрим задачу о возможности идентификации места обрыва провода воздушной линии (ВЛ), выполненной на основе ПНТ (рис.1, а) [4]. ПНТ конструктивно подобен обычному алюминиевому неизолированному проводу для линий электропередачи марок А, АКП, АС, скрученному концентрическими повивами в чередующихся направлениях из алюминиевых проволок АТ, АТП, но отличается тем, что

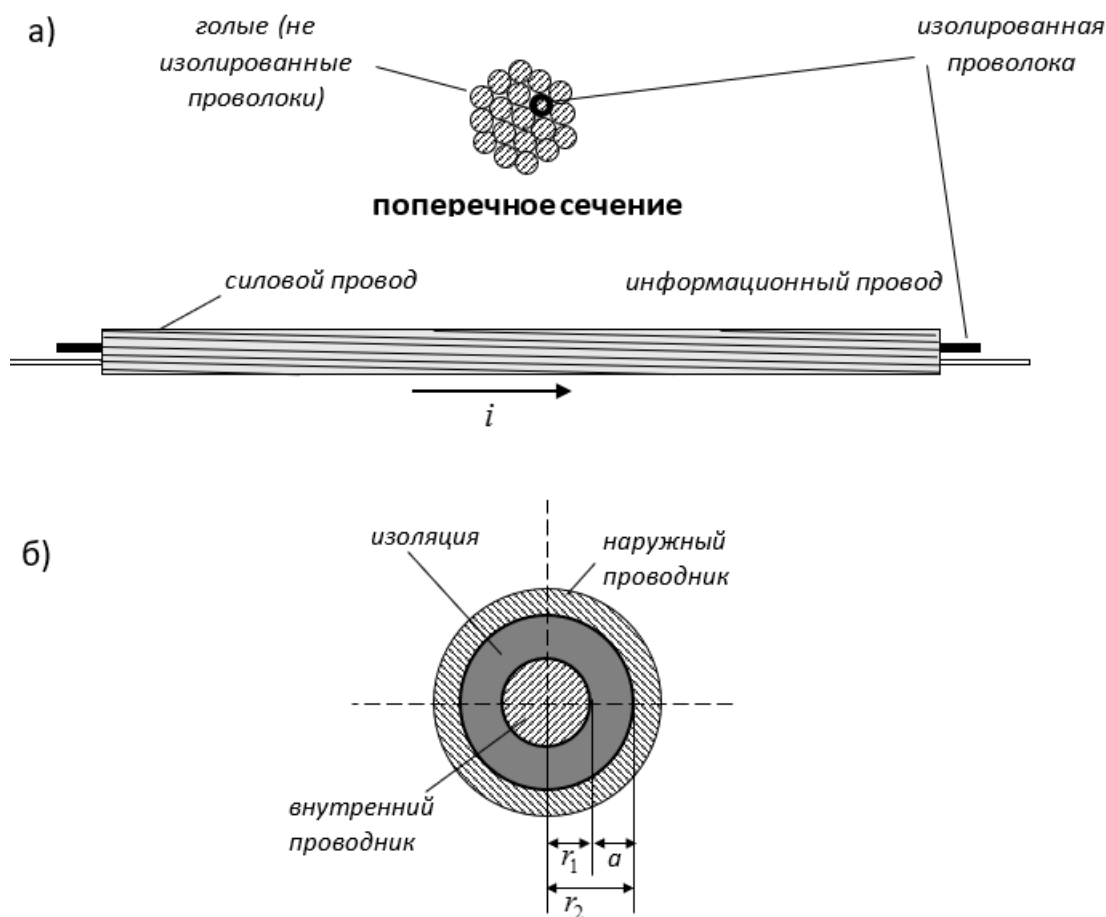


Рисунок 1 – Провод нового типа (ПНТ) для воздушной ЛЭП (а); представление ПНТ в виде коаксиальной пары (б), где r_1 – радиус информационного провода, r_2 – радиус поверх изоляции информационного провода

один из проводов токопроводящей жилы изолирован от остальных, как показано на рис.1, а. Следовательно, многофункциональный провод (МП) состоит из двух составляющих: силовой провод (СП), предназначенный для передачи электрической энергии; информационный провод (ИП).

При анализе электромагнитных процессов ПНТ можно представить как коаксиальный кабель [5] (рис. 1, б), схема замещения которого представляет собой электрическую цепь с распределенными параметрами.

В [6] рассмотрена схема обнаружения обрыва провода воздушной линии (ВЛ), где использован ПНТ. В данном разделе работы проведен анализ возможности идентификации места обрыва провода ВЛ с использованием ПНТ более простым способом.

Решение задачи

При решении задачи приняты следующие допущения: не рассматриваются вопросы состояния изоляции ИП при обрыве высоковольтных проводов; на значение разности потенциалов между СП и ИП в момент обрыва высоковольтного провода не оказывают существенного влияния фазы высоковольтного напряжения.

Рассмотрим ЛЭП (230 кВ), представляющую трехфазную воздушную линию электропередачи длиной $l = 18$ км, выполненную проводом нового типа. На рис.2 изображена только одна фаза, где к приемному концу линии передачи подключена нагрузка Z_n (75 МВт, 20 МВАр). Электрические параметры ВЛ: $L_0 = 0,92 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $R_0 = 0,035$ Ом/км, $C_0 = 0,00645 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. В конце линии информационный провод накоротко соединен с силовым проводом. В начале линии в соответствии с поставленной задачей проводится анализ разности потенциалов $V(t)$ между СП и ИП.

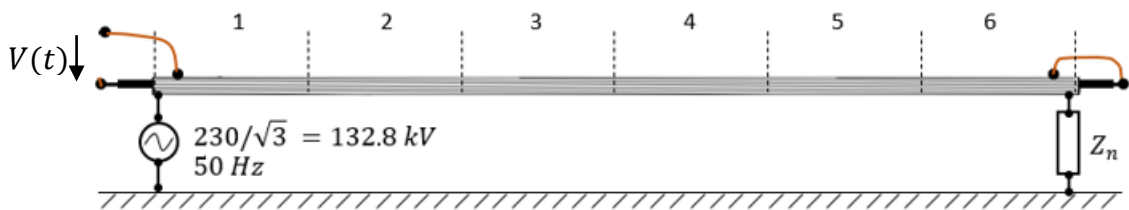


Рисунок 2 – ЛЭП на 230 кВ; Z_n – нагрузка; $V(t)$ – разность потенциалов между СП и ИП

Установление участка (1–6, рис.2), где произошёл обрыв провода ВЛ, осуществляется по величине сигнала (значение разности потенциалов между СП и ИП или по характеру изменения этой разности потенциалов, связанного с переходными процессом в момент обрыва).

Для обоснования этого положения построена компьютерная модель (рис.3) рассматриваемой задачи в среде Simulink/SimPowerSystems.

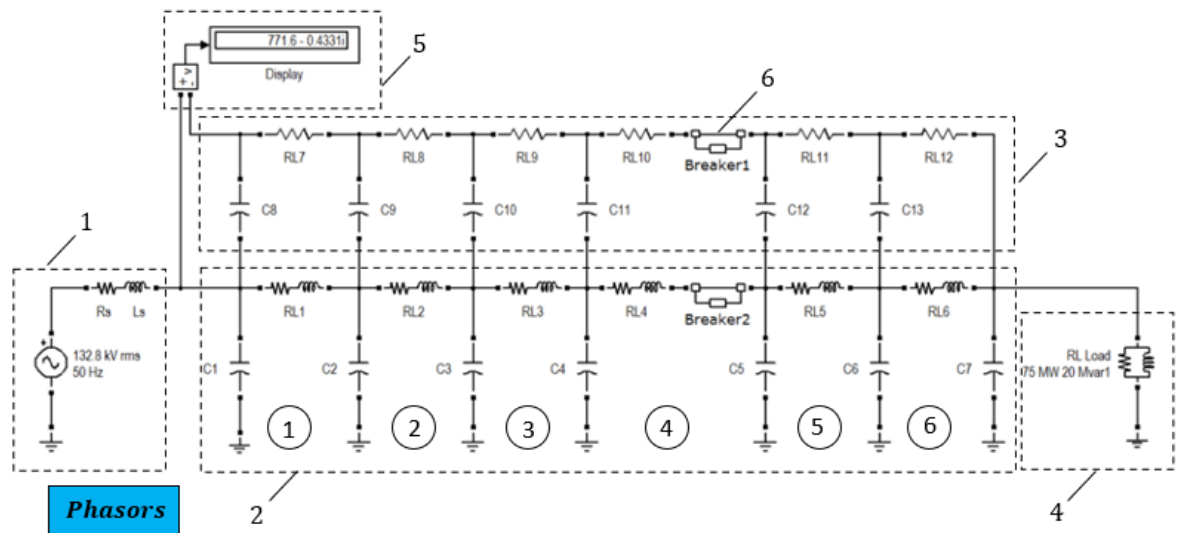


Рисунок 3 – Компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems, в режиме Phasors

Используя эту модель, рассчитаем величину сигнала, представляющую собой разность потенциалов между СП и ИП, а также проанализируем характер переходных процессов при обрыве провода на различных участках линии. По нашему мнению, сравнение величин этих сигналов, а также сопоставление переходных процессов позволит идентифицировать место обрыва провода ВЛ.

На рис.3 представлена в среде Simulink/SimPowerSystems компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ, где: 1 – эквивалентный источник моделируется источником напряжения (230 кВ_{RMS}/sqrt(3) или 132,8 кВ, 50 Гц), соединенным последовательно с полным внутренним сопротивлением (R_s и L_s); 2, 3 – схемы замещения силового и информационного проводов с использованием блоков PI Section Line; 4 – схема замещения RL – нагрузки; 5 – измеритель разности потенциалов между СП и ИП; 6 – Breaker выключатель для моделирования обрыва провода; окружности с цифрами 1 ÷ 6 – номера участков ЛЭП, в пределах которых с помощью выключателей моделируются обрывы ПНТ; Phasors – блок Powergui, представляет собой инструмент графического интерфейса пользователя. С помощью этого блока можно решить многие задачи (11), включая расчёты схем векторным методом (Phasorsimulation).

Блок PI Section Line [7] создаёт однофазную линию передачи с параметрами, объединенными в секции PI. Все параметры воздушной линии электропередачи распределены равномерно вдоль линии. Математическая модель линии электропередачи создаётся путём каскадирования шести идентичных секций PI (рис. 3 (2, 3)). Количество используемых секций зависит от представляемого частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании.

Наиболее приближенное значение максимального диапазона частот линии PI определяется [7]:

$$f_{max} = \frac{Nv}{8l},$$

где f_{max} – максимальная частота, Гц; $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – скорость распространения, км/с; l – длина линии, км; N – число секций при измерении индуктивности (Гн/км) и емкости (Ф/км).

Например, для воздушной линии длиной 100 км со скоростью распространения 300 000 км/с максимальный частотный диапазон, представленный одной секцией PI, составляет примерно 375 Гц. Для изучения взаимодействия между энергосистемой и системой управления этой простой модели достаточно. Однако для исследования процессов с участием высокочастотных переходных процессов в диапазоне кГц следует использовать гораздо более короткие участки PI [7].

В нашем случае общая длина линии $l = 18$ км, а количество секций – 6, следовательно, длина каждой секции $l_{sec} = l/6 = 3$ км. По мнению [7], для коротких участков линии (приблизительно $l_{sec} < 50$ км) параметры RLC, которые должны использоваться для каждого участка линии, задаются следующим образом:

$$R = R_0 \cdot l_{sec}, L = L_0 \cdot l_{sec}, C = C_0 \cdot l_{sec}.$$

Следовательно, электрические параметры каждой секции силового провода равны: $R = 0,035 \text{ Ом/км} \cdot 3 \text{ км} = 0,105 \text{ Ом}$, $L = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км} \cdot 3 \text{ км} = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$, $C = 0,00645 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км} \cdot 3 \text{ км} = 0,01935 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. Для информационного провода электрические параметры приняты приблизительно такими же, за исключением емкости. Так как расстояние между электродами коаксиальной системы маленькое, то значение этой емкости оценено приблизительно значением $0,01935 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$. Параметры элементов компьютерной модели (рис.3) вводятся с помощью окон задания параметров.

При проведении численного эксперимента (ЧЭ) с целью определения разности потенциалов между СП и ИП в предположении, что на каком-то участке линии произошёл обрыв провода, устанавливаем на этом участке выключатель как в силовом, так и информационном проводах и задаем момент времени обрыва путем его настройки. В нашем случае контакты выключателя изначально находятся в замкнутом состоянии. Через промежуток времени, равный $11/60 = 0,183$ сек машинного времени, контакты выключателя (Breaker) переходят в разомкнутое состояние, моделируя обрыв как

силового, так и информационного проводов. На рис.3 выключатели Breaker1 и Breaker2 моделируют обрыв СП и ИП в шестой секции ВЛ.

Результаты моделирования

С целью идентификации места обрыва ВЛ, используя векторный метод (Phasorsimulation), рассчитаем в схеме (рис.3) разности потенциалов между СП и ИП при обрыве ПНТ в различных секциях ВЛ. В результате получаем комплексные токи и напряжения, т.е. синусоидальные напряжения и токи (таблица 1). Для выполнения этого метода необходимо в окне Powergui выбрать режим расчета Phasorsimulation (PS) и задать частоту источников в графе Frequency.

Таблица 1
Результаты моделирования при обрыве ПНТ в различных секциях ВЛ

Номера секций, где произошло обрыв провода	1	2	3	4	5	6
Показания вольтметров	3087 + +50.24 · j	1544 + +11.92 · j	1029 + +3.8 · j	771.6 – –0.4331 · j	616.8 – –4.017 · j	513.3 – –7.748 · j
Разности показаний вольтметров	$V_1 - V_2 =$ 1543 + 38,32 · j	$V_2 - V_3 =$ 515 + 8,12 · j	$V_3 - V_4 =$ 257,4 + 4,233 · j	$V_4 - V_5 =$ 154.8 + 3.584 · j	$V_5 - V_6 =$ 103.5 + 3.731 · j	

В табл. 1: первая строка – номера секций, где произошел обрыв провода; вторая строка – соответствующие значения разности потенциалов между СП и ИП; третья строка – разности показаний измерителей напряжения в смежных секциях.

Сопоставляя разности потенциалов между СП и ИП и номера секций, где произошёл обрыв провода, замечаем, что существует между ними взаимосвязь. Следовательно, есть возможность идентификации места обрыва ВЛ.

Чтобы выяснить возможность идентификации места обрыва провода с помощью сравнения характера переходных процессов [8, 9, 10] в момент обрыва провода на различных участках ВЛ, проанализируем их гармонический состав. Для этого проведем модификацию модели рис.3 путем подключения измерителя тока в СП, замены блока Display на Scope и настройки компьютерной модели на режим Continuous (рис.4).

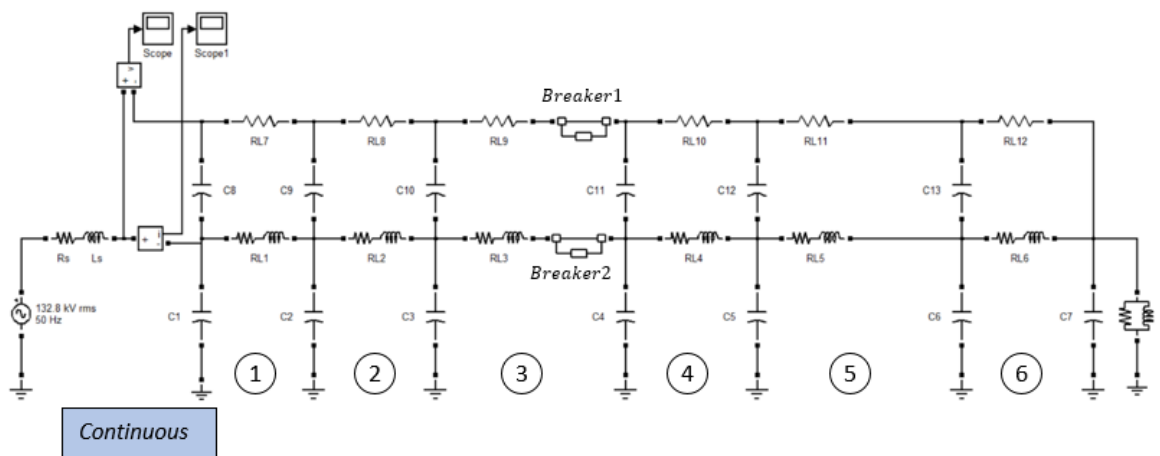


Рисунок 4 – Компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems, обрыв провода в секции 3, моделирование реализовано в режиме Continuous

На рис.4 выключатели установлены в третьей секции, следовательно моделируется обрыв провода в этой секции. Выключатели Breaker1, Breaker2, установленные соответственно в информационном и силовом проводах ПНТ, настроены так, что они

срабатывают через 0,183 с после запуска программы и обрывают соответственно ИП и СП воздушной линии.

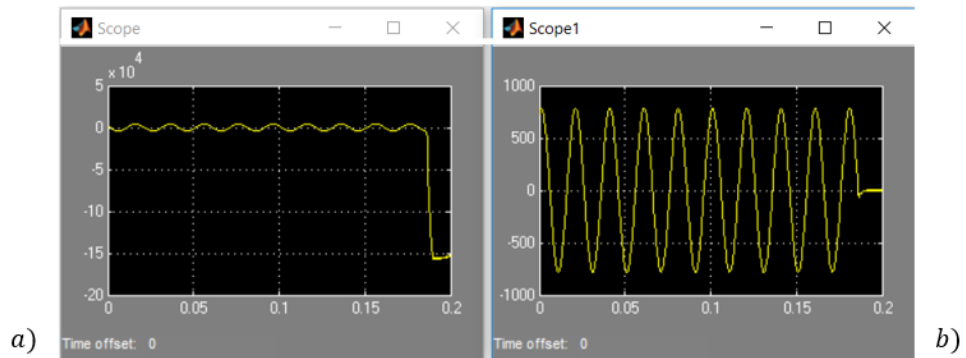


Рисунок 5 – Осциллограммы зависимостей:

a) – разности потенциалов между СП и ИП;

b) – ток в силовом проводе ПНТ в момент 0,182 с, когда произошёл обрыв провода

Для моделирования обрыва проводов на другой секции, например, пятой, выключатели будут перенесены на эту секцию. На рис.5, a), b) соответственно представлены осциллограммы зависимостей разности потенциалов между СП и ИП и тока в силовом проводе ПНТ в момент 0,182 с, когда произошёл обрыв провода.

Результаты моделирования

Результаты гармонического анализа зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП в момент времени (0,182 с) срабатывания выключателей.

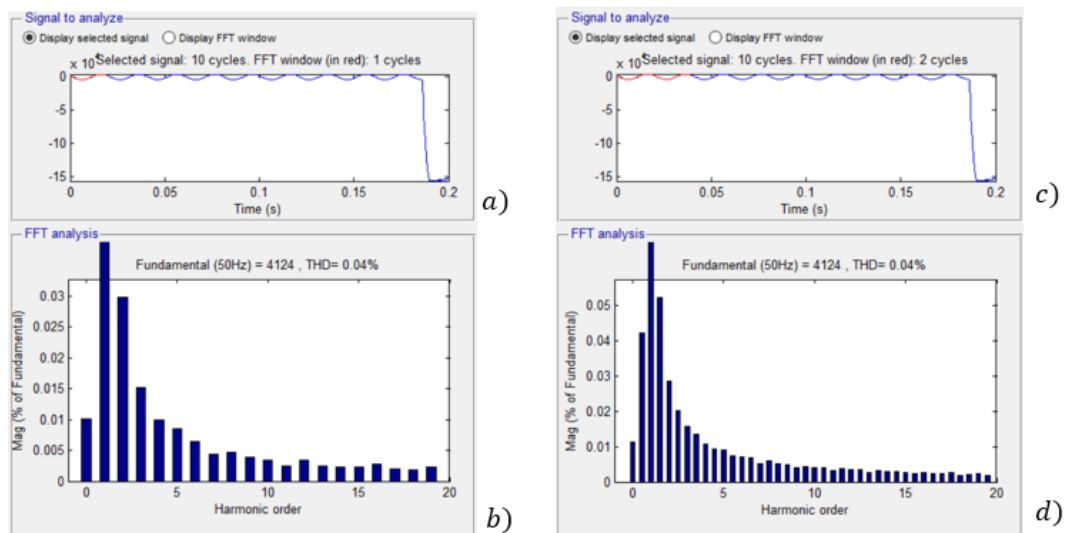


Рисунок 6 – a) – осциллограмма зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП до момента срабатывания выключателей с одним выделенным периодом (красным цветом); b) – гистограмма амплитуд гармоник, соответствующая выделенному красным цветом одному периоду зависимости; c), d) – аналогичные зависимости для двух периодов зависимости (выделена красным цветом). Вышеприведенные зависимости соответствуют моменту обрыва провода в третьей секции ВЛ

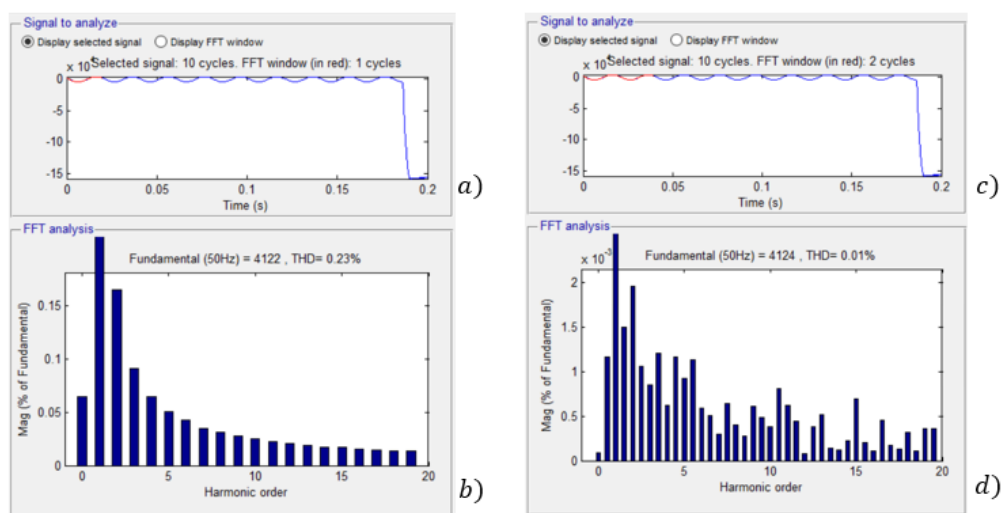


Рисунок 7 – Те же зависимости, что и на рис. 6, при обрыве провода в пятой секции ВЛ

На рис. 5, а) – представлена осциллограмма зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП до момента срабатывания выключателей. В рассматриваемом варианте выполнен гармонический анализ только для выделенного участка (красным цветом) длительностью в один период; б) – результат гармонического анализа в виде гистограммы амплитуд гармоник выделенного участка зависимости; в), д) – аналогичные зависимости, когда выделены два периода. Вышерассмотренные зависимости соответствуют моменту обрыва провода в третьей секции ВЛ.

На рис.6 представлены те же зависимости, что и на рис. 5, только предполагается, что обрыв провода произошёл в пятой секции ВЛ.

Сопоставление результатов гармонического анализа показывает возможность идентификации места обрыва провода, что позволяет диагностировать состояние ВЛ.

Заключение

Проведен анализ возможности идентификации места обрыва провода ВЛ с использованием ПНТ более простым способом. Для обоснования способа идентификации места обрыва построена компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems и проведено компьютерное моделирование. Проведенный анализ результатов моделирования показал возможность идентификации места обрыва провода на линиях электропередачи.

Литература

1. Бейсенби М.А., Булатбаева Ю.Ф., Закарина А.Ж. Системы контроля и мониторинга линии электропередачи// http://rusnauka.com/39_FPN_2016/Tecnic/12_217596.doc.htm.
2. Самарин А., Масалов В. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП. // Control Engineering . – 2013 –№ 3(45). – С. 88 – 94.
3. Брейдо И.В. Разработка распределенных программно-технических комплексов защит и диагностики элементов высоковольтных линий электропередачи. // Отчет о научно-исследовательской работе. – Караганда. – 2014.
4. Токпроводящая жила проводов и кабелей [Текст] / [С.М. Асанова, Ж.С. Иманакунова, К.А. Сатаркулов и др.] // ГАНИС при правительстве КР (Кыргызпатент). – Патент KG №1187. – 2009 г.
5. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи [Текст]: Учеб. пособие для вузов / П.Н. Матханов. – М.: ВШ, 1977. – 272 с.

6. Asanova S.M., Ahyoev J.S., Askarbek N., Suerkulov S.M., Asanova D.U., Safaraliev M. Method for designing drop-of-wire recognition systems on sections of undistorted two-wire power transmission lines. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 966, 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy 18-19 June 2020, Nizhny Tagil, Russia.](#)
7. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
8. Исследование переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе компьютерного моделирования / Г. Ш. Эралиева, Ж. К. Абдыбаева, А. Асан уулу, Н. А. Суюнтбекова // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2(41). – С. 100-108. – EDN BNZONQ.
9. Применение среды Labview для исследования переходных процессов в силовых кабелях с целью контроля состояния его изоляции / А. Т. Асиев, Т. Кабаев, З. А. Узагалиев, Р. К. Мусаев // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 3(42). – С. 111-120. – EDN USRRDD.
10. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. [Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами](#) // [Известия КГТУ им. И. Раззакова](#). – 2012. – № 26. – С. 105 – 111.