УДК 681.5.09

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

[1]Борковский С.О., [1]Горева Т.С., [2]Пюкке Г.А., [1]Горева Т.И.

[1]Дальневосточный федеральный университет (филиал), Петропавловск-Камчатский, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru;

[2]Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский

В статье рассмотрена методика диагностирования наличия однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью. Представлены результаты стендовых испытаний на лабораторном оборудовании, моделирующем электромагнитные переходные процессы, протекающие в электроэнергетических системах 6–10 кВ. Произведен анализ гармонических составляющих напряжения, осциллограмм фазных напряжений «здоровых» и поврежденных фаз, векторных диаграмм фазных напряжений при повреждениях в различных частях энергосистемы: близкое и удаленное короткое замыкание, исследование напряжений в месте повреждения. Также в статье говорится о том, что наиболее перспективным направлением диагностирования однофазных замыканий на землю является изучение напряжений нулевой последовательности, а не токов, что в дальнейшем позволит отказаться от применения однотрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности и перейти к использованию трансформаторов напряжений, включенных на сумму векторов напряжений.

Ключевые слова: замыкание на землю, гармонические составляющие, диаграмма напряжения, несинусоидальность, анализатор качества электроэнергии, электрические сети торфо- и нефтеразработок

FEATURES VOLTAGE ELECTRIC NETWORKS FOR SINGLE PHASE EARTH FAULTS

[1]Borkowskiy S.O., [1]Goreva T.S., [2]Puykke G.A., [1]Goreva T.I.

[1]Far East Federal University, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru;

[2]Kamchatsky State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky

In the article the method of diagnosing the presence of single-phase earth fault in a network with isolated neutral. Presents the results of bench tests on laboratory equipment, simulating electromagnetic transient processes in electrical power systems of 6–10 kV. The analysis of the harmonic components of the voltage waveforms of the phase voltages healthy and damaged phase vector diagrams of the phase voltages in injuries in different parts of the energy system: near and remote short circuit, the study of stresses at the injury site. Also, the article States that the most promising direction for diagnosing single-phase earth fault is the study of the zero-sequence voltages, not currents that might make it possible to abandon the use of mono-transformer filters zero sequence currents and to use transformers of voltages included in the amount of voltage vectors.

Keywords: earth fault, harmonics, voltage chart, nonsinusoidal, power quality analyzer, electric networks of peat – and oil field

Поставим задачей определение особенностей, присущих фазным и линейным напряжениям электрической сети с изолированной нейтралью при возникновении в ней бездугового однофазного короткого замыкания на землю.

Однолинейная электрическая схема упрощенной системы электроснабжения предприятия нефтедобычи представлена на рис. 1.

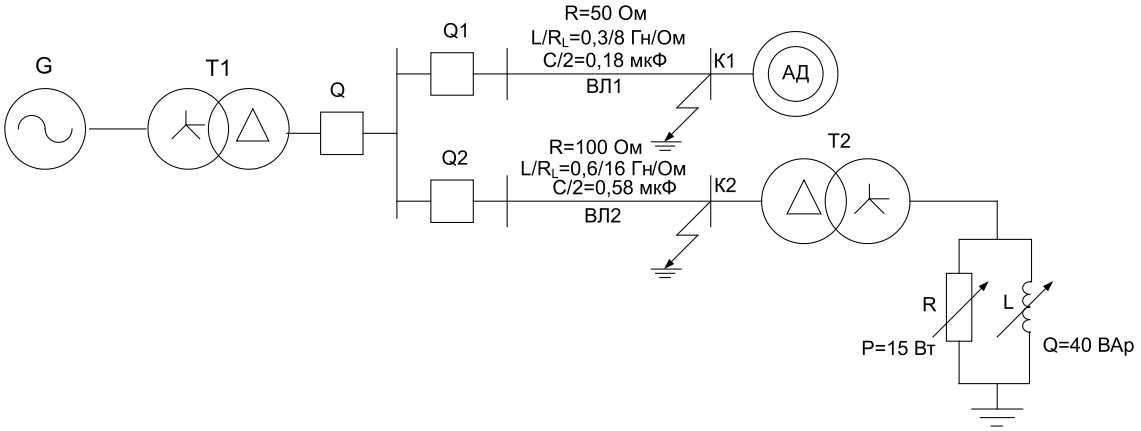


Рис. 1. Однолинейная схема разветвленной электрической сети с двумя присоединениями

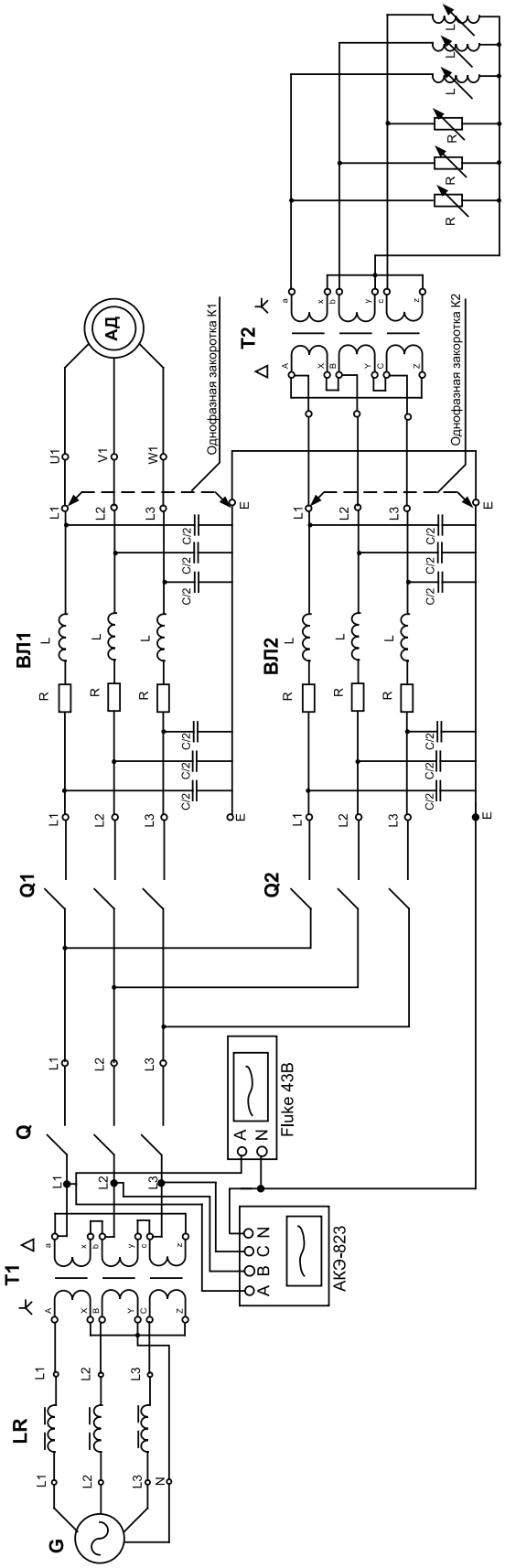


Рис. 2. Трехфазная схема разветвленной электрической сети с двумя присоединениями

Трехфазная схема системы электроснабжения района нефтедобычи представлена на рис. 2.

Как правило, питание электроустановок нефтяной промышленности осуществляется с помощью воздушных линий электропередач напряжением 6–10 кВ по радиальной схеме. К основным энергоустановкам данной отрасли промышленности относятся: компрессорные станции, водяные насосы и насосы перекачки нефти, буровые станции, водяные насосы поддержания пластового давления, трансформаторные подстанции 6(10) кВ/0,4 кВ. При этом солидную долю нагрузки составляют электродвигатели – высоковольтные на напряжение 6 кВ (приводы буровых насосов, лебедок) и низковольтные – 0,4 кВ (двигатели вспомогательных агрегатов) [6].

Моделирование режима работы энергосистемы проводилось на учебном лабораторном комплексе «Модель комплексной электрической нагрузки». Данное оборудование позволяет воспроизводить электромагнитные и электромеханические процессы в комплексной нагрузке, имеющие место при установившейся работе, возмущениях и управляющих воздействиях [8].

Параметры работы энергосистемы измерялись следующими приборами:

Анализатор качества электроэнергии АКЭ-823; анализатор качества электроэнергии Fluke 43B. Данные контрольно-измерительные приборы позволяют снимать в режиме реального времени осциллограммы фазных и линейных напряжений электрической сети с возможностью их последующий цифровой обработки и создания отчетов в ППО Microsoft Excel 2010. Кроме этого имеется возможность измерения гармонических составляющих напряжений электрической сети и построения АЧХ при различных режимах работы. Подробнее о функциональных возможностях приборов можно прочитать в [2, 4].

Внешний вид приборов и лабораторного стенда представлен на рис. 3.

Методика измерений

Рассматриваемая модель электрической системы (рис. 1, 2) представляет собой частный случай реальной электрической сети напряжением 10(6) кВ с изолированной нейтралью. Данная система состоит из двух параллельных линий электропередач ВЛ1 и ВЛ2. Основными параметрами, характеризующими линии, являются: активное сопротивление – *R*, – определяющее длину линии, индуктивное сопротивление – *L*, определяющее конструктивные особенности ЛЭП и значение емкости фаз относительно земли – С, определяющее суммарную протяженность линий электропередач всей энергосистемы. В качестве нагруз-

ки к одной из линий подключён асинхронный двигатель, моделирующий высоковольтные двигатели насосов нефтеперекачки, а к другой – трансформатор, моделирующий трансформаторную подстанцию 10(6)/0,4 кВ с активно-индуктивной нагрузкой.

В процессе работы энергосистемы будем записывать осциллограммы напряжений и проводить гармонический анализ напряжений для двух режимов работы:

1. Нормальный режим работы.

2. Аварийный режим работы, включающий в себя:

2.1. однофазное замыкание на землю фазы «А» на линии электропередачи ВЛ1(точка К1);

2.2. однофазное замыкание на землю фазы «А» на линии электропередачи ВЛ2 (точка К2);

Целью эксперимента является выделение особенностей, присущих напряжениям электрической сети при различных режимах работы, связанных с возникновением ЗНЗ.

Результаты эксперимента

1. Нормальный режим работы

Фазные напряжения неповрежденной сети представлены на рис. 4.

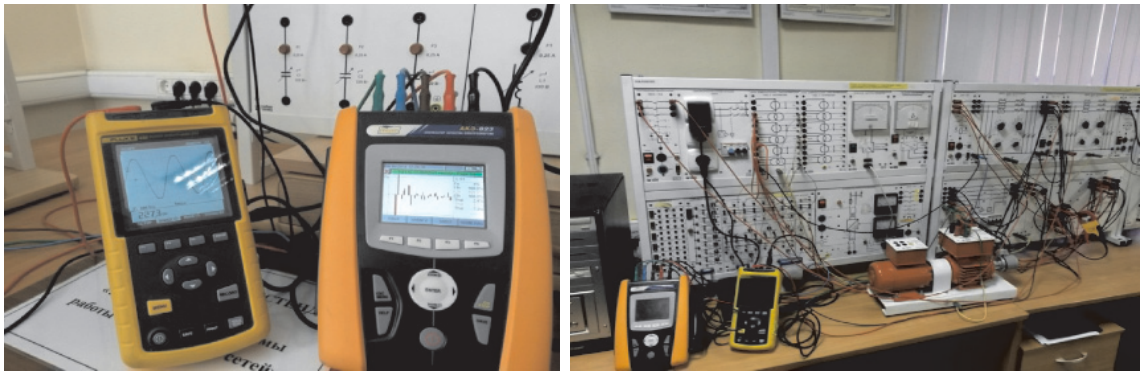
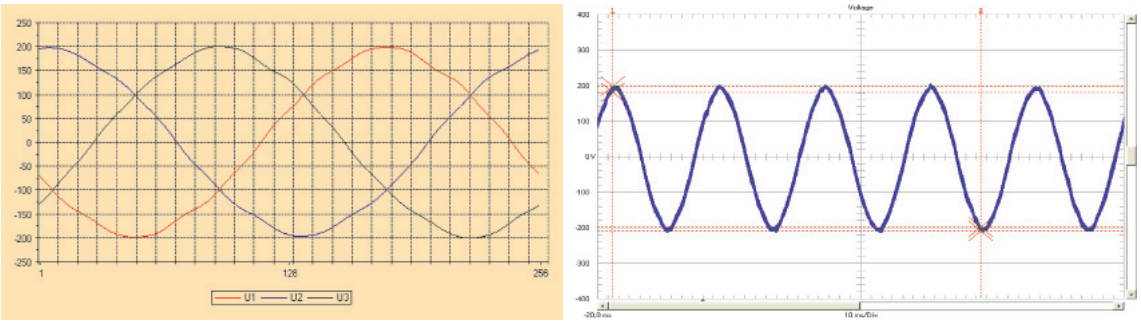
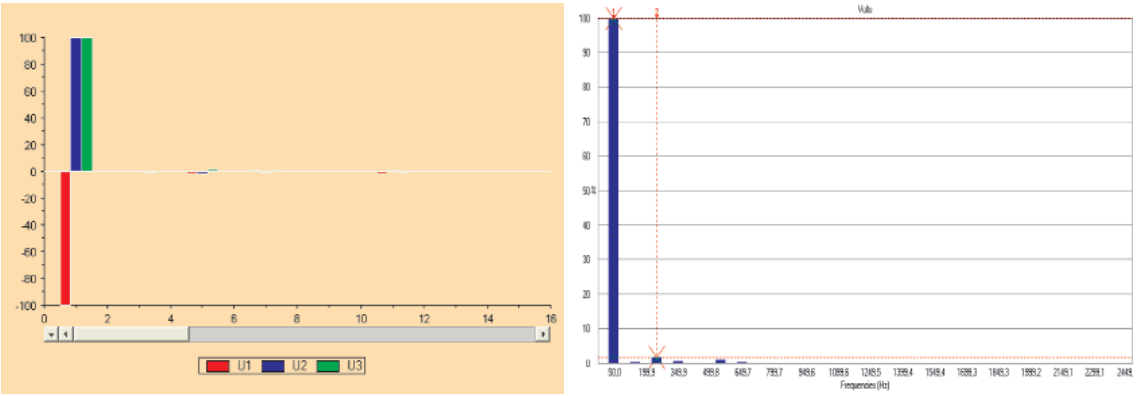


Рис. 3. Контрольно-измерительные приборы и лабораторный стенд для моделирования режимов работы ЭЭС



Фазные напряжения АКЭ-823 | Напряжение фазы «А», Fluke 43B

Рис. 4. Напряжения фаз относительно земли в нормальном режиме



Гармонический анализ фазных напряжений, АКЭ-823 | Гармонический анализ напряжения фазы «А», Fluke 43B

Рис. 5. Гармонический анализ фазных напряжений

Таблица 1

Амплитудные значения величин гармоник, АКЭ-823

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда, %		
		U1	U2	U3
1	50	–100	100	100
3	150	0,32	0,39	–0,5
5	250	–1,74	–1,96	1,85
7	350	0,68	–0,76	0,67
11	550	–1,26	0,79	–1,0
13	650	–0,29	0	0

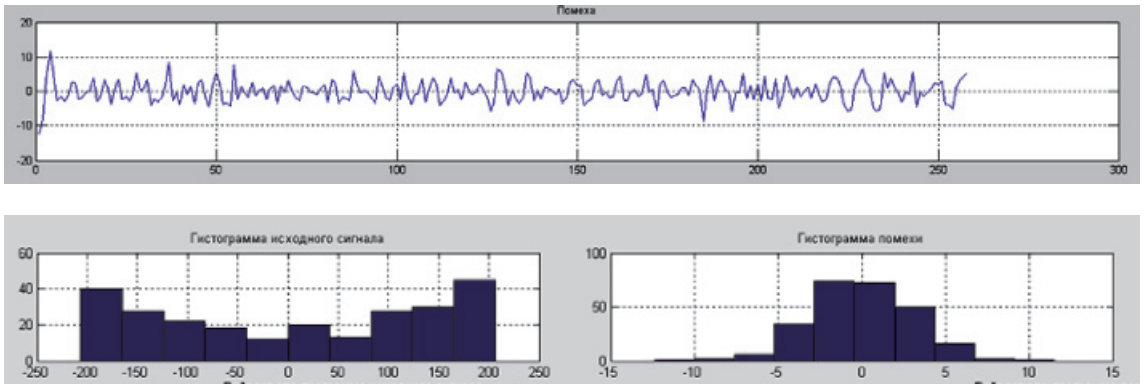


Рис. 6. Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи [4, 5]

Гармонический анализ фазных напряжений при нормальном режиме работы представлен на рис. 5.

Амплитудные значения величин гармоник напряжения сведены в табл. 1

Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи представлены на рис. 6

В нормальном режиме работы электроэнергетической системы гармонический состав напряжений определяет основная гармоника 50 Гц, обнаружены следы 5-й и 11-й гармонических составляющих.

2. Аварийный режим работы

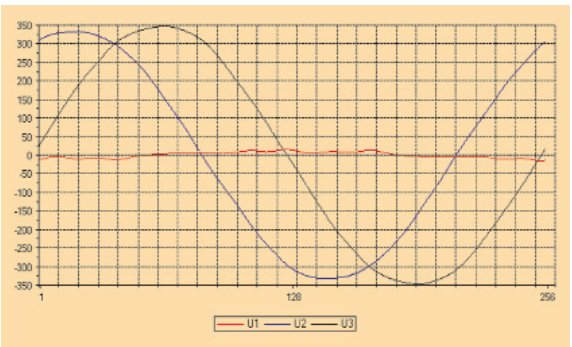
2.1. Однофазное замыкание на землю фазы «А» на линии электропередачи ВЛ1**,** – точка К1 – близкое к источнику питания ЗНЗ.

Фазные напряжения поврежденной сети представлены на рис. 7.

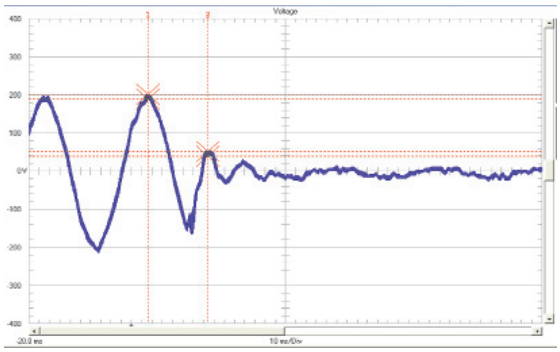
Гармонический анализ фазных напряжений при аварийном режиме работы представлен на рис. 8.

Амплитудные значения величин гармоник напряжения сведены в табл. 2.

Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи представлены на рис. 9.

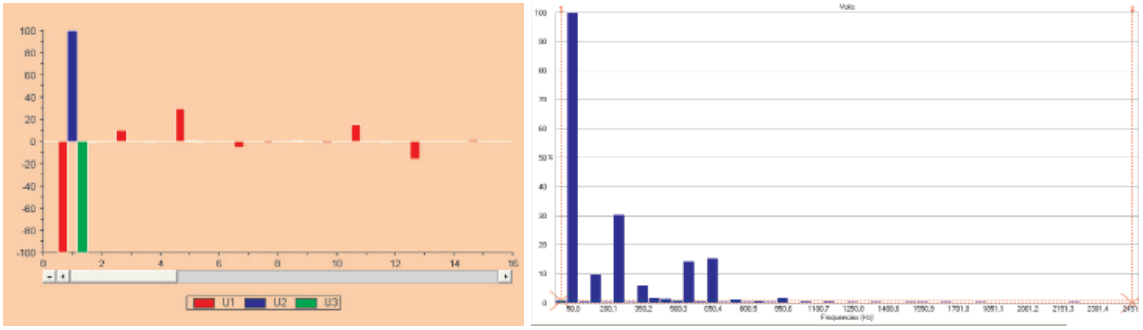


Фазные напряжения АКЭ-823



Напряжение фазы «А», Fluke 43B

Рис. 7. Напряжения фаз относительно земли в аварийном режиме



Гармонический анализ фазных напряжений, АКЭ-823

Гармонический анализ напряжения фазы «А», Fluke 43B

Рис. 8. Гармонический анализ фазных напряжений

Таблица 2

Амплитудные значения величин гармоник, АКЭ-823

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда, %		
		U1	U2	U3
1	50	–100	100	–100
2	100	–1,06	0	0
3	150	10,27	0,32	0,28
4	200	–0,45	0	0
5	250	29,21	1,02	–0,84
7	350	–5,67	–0,31	0,38
8	400	–1,94	0	0
9	450	0,83	0	0
11	550	15,02	–0,32	0,39
13	650	–16,33	0	0

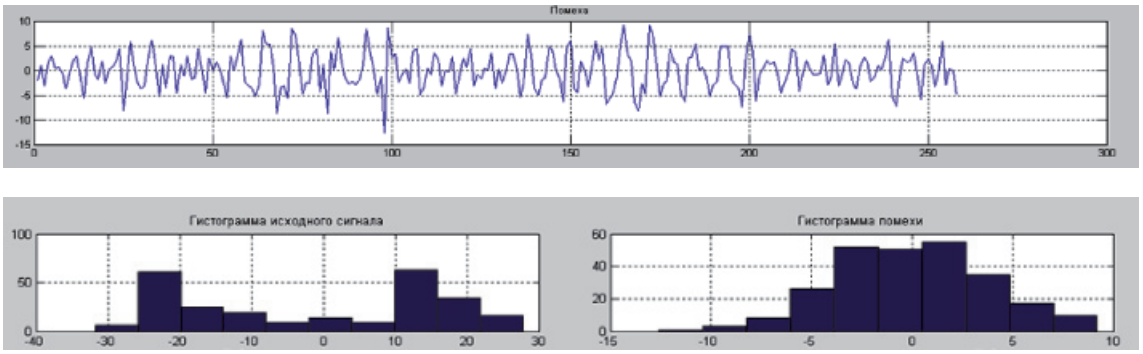


Рис. 9. Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи, представлен на рисунке [4, 5]

При близком к источнику питания ЗНЗ наблюдается резкое снижение остаточного напряжения поврежденной фазы, при этом переходной процесс длится порядка 2–2,5 периодов.

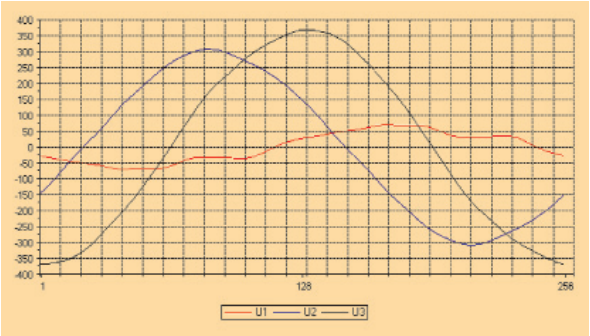
2.2. Однофазное замыкание на землю фазы «А» на линии электропередачи ВЛ2 – точка К2 – удаленное от источника питания ЗНЗ

Фазные напряжения поврежденной сети представлены на рис. 10.

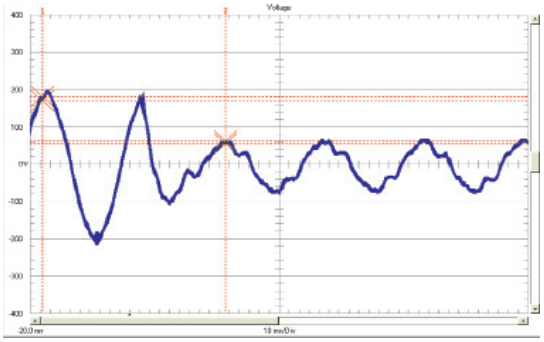
Гармонический анализ фазных напряжений при аварийном режиме работы представлен на рис. 11.

Амплитудные значения величин гармоник напряжения сведены в табл. 3.

Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи для дальнего КЗ представлены на рис. 12.

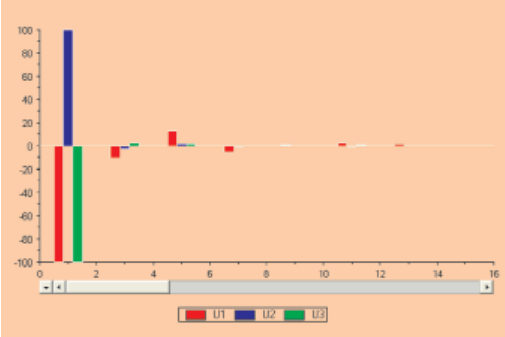


Фазные напряжения АКЭ-823

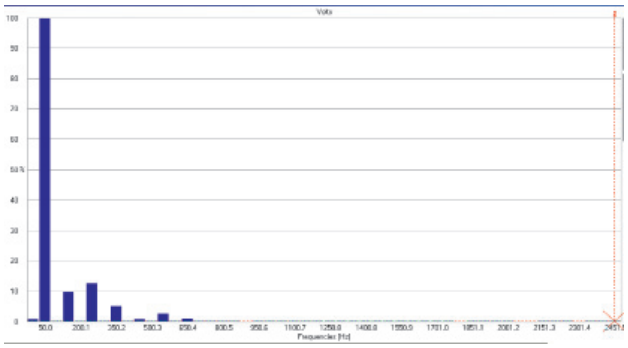


Напряжение фазы «А», Fluke 43B

Рис. 10. Напряжения фаз относительно земли в аварийном режиме



Гармонический анализ
фазных напряжений, АКЭ-823



Гармонический анализ
напряжения фазы «А», Fluke 43B

Рис. 11. Гармонический анализ фазных напряжений

Таблица 3

Амплитудные значения величин гармоник, АКЭ-823

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда, %		
		U1	U2	U3
1	50	–100	100	–100
2	100	0,22	0	0
3	150	–10,21	–2,13	2,34
4	200	0	0	0
5	250	12,91	1,25	1,31
7	350	–5,36	–0,51	–0,36
8	400	0	0	0
9	450	0,95	0	0
11	550	2,75	–0,48	0,41
13	650	1,28	–0,021	0

При однофазном замыкании на землю ярко выражена несинусоидальность напряжений, связанная с переходными процессами разряда емкости поврежденной фазы и подзарядом емкости неповрежденных фаз до линейных значений. Гармонический анализ фазных напряжений выявил резкое возрастание нечетных гармоник под номерами: 3, 5, 7, 11, 13 по сравнению с нормальным режимом работы, при этом данные гармонические составляющие возникают только в фазном напряжении поврежденной фазы.

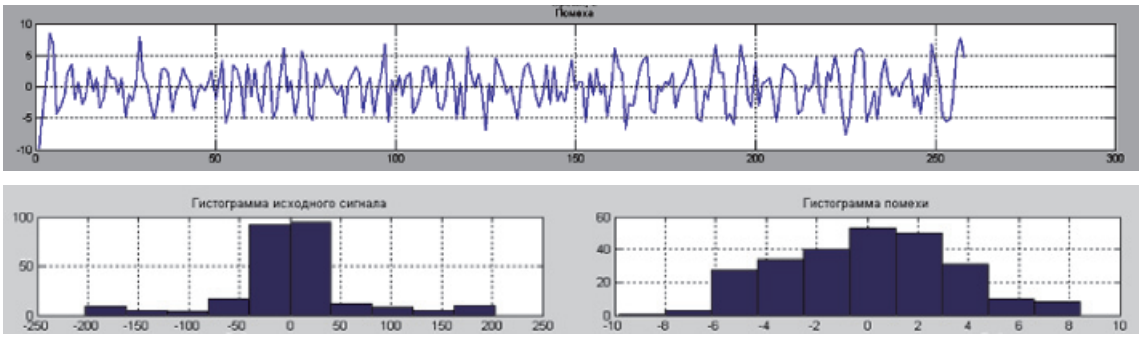


Рис. 12. Вейвлет-анализ напряжений и гистограмма помехи [4, 5]

Общие выводы

1. В нормальном режиме заметна несинусоидальность напряжений, связанная с наличием в составе нагрузки электродвигателя а также трансформаторов.

2. В нормальном режиме наиболее выражены нечетные гармоники: 3, 5, 7, 11 и 13-я, при этом их процентное содержание не превышает значений предельно допустимых концентраций, указанных в [3].

3. Концентрации других четных гармоник незначительны (менее 0,1%) или равны 0.

4. При однофазном замыкании на землю ярко выражена несинусоидальность напряжений, связанная с переходными процессами разряда емкости поврежденной фазы и подзарядом емкости неповрежденных фаз до линейных значений;

5. Гармонический анализ фазных напряжений выявил резкое возрастание нечетных гармоник под номерами 3, 5, 7, 11, 13 по сравнению с нормальным режимом работы, при этом данные гармонические составляющие возникают только в фазном напряжении поврежденной фазы.

6. Гармонический состав фазных напряжений неповрежденных «здоровых» фаз при наличии ЗНЗ в системе мало отличается от гармонического состава при нормальном режиме работы.

7. Сравнительный анализ гармонического состава напряжений при разного рода повреждениях выявил, что величина 3 гармоники зависит от протяженности ВЛ (или от близости места ЗНЗ) – чем ближе место ЗНЗ к источнику питания или чем меньшим активным сопротивлением ВЛ оно ограничено (т.е. чем короче линия), тем более значительна величина 3 гармоники.

Таким образом, данные результаты экспериментов могут быть использованы для разработки алгоритмов действия селективной релейной защиты от однофазных коротких замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралями. Наиболее актуальным видится выделение 3, 5, 7, 11, 13 гармонических составляющих напряжения, что позволит отказаться от измерительных трансформаторов тока нулевой последовательности и необходимости использования кабельных вставок, что особенно затруднительно на воздушных линиях электропередач.

Современная цифровая вычислительная техника дает возможность выполнить микропроцессорное устройство релейной защиты, существенно повышающее ее надежность и селективность функционирования при ЗНЗ в сетях с изолированной нейтралью. Реализация алгоритма функционирования такой защиты основывается на базе вейвлет-преобразования временной функции. Измерительный орган микропроцессорного комплекта защиты сможет выделять сигнал всех высших гармонических составляющих, содержащихся в напряжении нулевой последовательности, что более целесообразно, чем выделение какой-либо одной гармоники.

В связи с этим механизм выделения гармонического спектра предлагается выполнять на основе вейвлет-преобразования. Вейвлет-преобразование удобно использовать для анализа нестационарных (несинусоидальных) сигналов, где оно оказывается более эффективным, чем традиционное преобразование Фурье. Применимо использовать вейвлет-преобразование для обнаружения и распознания локальных особенностей сигналов электромагнитных переходных процессов в системах электроснабжения. В настоящее время вейвлет-преобразование находит все более широкое применение для прогноза временных рядов (или сигналов). Таким образом, можно прогнозировать развитие переходного процесса в определенный момент времени [8].

Современные микропроцессорные устройства противоаварийной автоматики, предназначенные для распределительных

сетей с изолированной и компенсированной нейтралью, а также для защиты электродвигателей, выполняют следующие функции:

– отключение междуфазных КЗ программными трехступенчатыми токовыми или дистанционными защитами;

– отключение однофазных замыканий на землю программной защитой, действующей от высших гармоник тока нулевой последовательности;

– отключение при несимметрии (при «потере» фазы) электродвигателем и другие функции.

Микропроцессор выполняет функции нерекурсивных цифровых частотных фильтров принужденных составляющих переходного процесса КЗ, выделяя их ортогональные составляющие и симметричную составляющую обратной последовательности, и вычисляет сумму гармоник (7-й и близких к ней) тока нулевой последовательности [7].

Ортогональные составляющие формируются нерекурсивными и адаптивными частотными фильтрами на основе преобразований Фурье. Для анализа нестационарных сигналов более эффективным, чем традиционное преобразование Фурье, является вейвлет-преобразование. Поэтому вейвлет-преобразование применимо использовать для обнаружения и распознания локальных особенностей напряжений при электромагнитных переходных процессах в системах электроснабжения. Вейвлет-преобразование можно применять и для прогноза временных рядов (или сигналов), что позволит прогнозировать развитие переходного процесса в определенный момент времени [8].

Список литературы

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и применение // Успехи физических наук. – 1998. – 26 с.

2. Борковский С.О., Горева Т.С., Горева Т.И. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–5. – С. 954–959.

3. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная совместимость нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения».

4. Горева Т.С., Кузнецов С.Е., Портнягин Н.Н., Горева Т.И. Анализатор импульсных и флуктуационные помех случайного характера в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлет базисе: Свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16624. – М.: ИНИМ РАО, 2011. – 15 с.

5. Горева Т.С., Портнягин Н.Н. Методы построения активных фильтров подавления импульсных помех в сетях электропитания промысловых судов: монография. – М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2010. – 102 с.

6. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 248 с.

7. Овчаренко Н. И. Автоматика энергосистем: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 296 с.

8. Сенигов П.Н., Галишников Ю.П., Манцеров Е.А., Карпеш М.А. Руководство по выполнению базовых экспериментов. «Модель комплексной электрической нагрузки». – Челябинск, 2003. – 210 с.

References

1. Astafeva N.M. Vejvlet-analiz: osnovy teorii i primenenie // Uspehi fizicheskih nauk. 1998. 26 p.

2. Borkovskij S.O., Goreva T.S., Goreva T.I. Problema diagnostiki odnofaznyh zamykanij na zemlju v setjah s malymi tokami zamykanija na zemlju // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–5. pp. 954–959.

3. GOST 13109-97 «Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost tehnicheskih sredstv jelektromagnitnaja sovmestimost normy kachestva jelektrojenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija».

4. Goreva T.S., Kuznecov S.E., Portnjagin N.N., Goreva T.I. Analizator impulsnyh i fluktuacionnye pomeh sluchajnogo haraktera v sistemah jelektrosnabzhenija s identifikaciej strukturnyh komponent v ortogonalnom vejvlet bazise: Svidetelstvo ob otraslevoj registracii kompleksa programm dlja JeVM no. 16624. M.: INIM RAO, 2011. 15 p.

5. Goreva T.S., Portnjagin N.N. Metody postroenija aktivnyh filtrov podavlenija impulsnyh pomeh v setjah jelektropitanija promyslovyh sudov: monografija. M.: Izd-vo «Akademija Estestvoznanija», 2010. 102 p.

6. Kabyshev A.V., Obuhov S.G. Raschet i proektirovanie sistem jelektrosnabzhenija obektov i ustanovok: uchebnoe posobie. Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. 248 p.

7. Ovcharenko N.I. Avtomatika jenergosistem: uchebnik dlja vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izdatelskij dom MJeI, 2007. 296 p.

8. Senigov P.N., Galishnikov Ju.P., Mancerov E.A., Karpesh M.A. Rukovodstvo po vypolneniju bazovyh jeksperimentov. «Model kompleksnoj jelektricheskoj nagruzki». Cheljabinsk, 2003. 210 p.

Рецензенты:

Портнягин Н.Н., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника и электрофикация нефтяной и газовой промышленности», Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва;

Потапов В.В., д.т.н., профессор, зав. лаборатории химии кремнезема в современных гидротермальных процессах, ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Петропавловск-Камчатский.

Работа поступила в редакцию 01.04.2015.