

ний (с изменением № 1). – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 26 с.

4. ГОСТ Р 52517-2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного масла. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 33 с.

5. Баширов Р.М., Сафин Ф.Р., Инсафуддинов С.З. Совершенствование методики регулирования топливной аппаратуры тракторных дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2014. – Вып. № 3 (31). – С. 60-64.

6. Способ диагностирования и регулирования дизельной топливной аппаратуры на двигателе / Баширов Р.М., Сафин Ф.Р., Магафуров Р.Ж., Юльбердин Р.Р., Туктаров М.Ф., патент на изобретение №2668589 от 30.01.2018 г.

7. www.denso-am.eu. Denso. Electronical Technical Service Information.

8. Patent №5801308, G01F 3/24. Measuring apparatus for measuring an injected quantity of liquid. – Denso Corporation, Kariya, Japan. – Filed. 04.09.1997. Pub. 1.09.1998.

2. GOST 18509-88. Dizeli traktornye i kombaynovye. Metody stendovyykh ispytaniy. – М.: Izd-vo standartov, 1988. – 46 s.

3. GOST 10448-2014. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Priemka. Metody ispytaniy (s izmeneniem No. 1). – М.: Izd-vo standartov, 2016. – 26 s.

4. GOST R 52517-2005. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Kharakteristiki. Chast 1. Standartnye iskhodnye usloviya, obyavlenie moshchnosti, raskhoda topliva i smazochnogo masla. Metody ispytaniy. – М.: Izd-vo standartov, 2005. – 33 s.

5. Bashirov R.M., Safin F.R., Insafuddinov S.Z. Sovershenstvovanie metodiki regulirovaniya toplivnoy apparatury traktornykh dizeley // Vestnik Bashkirkского gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – Vyp. No. 3 (31). – S. 60-64.

6. Sposob diagnostirovaniya i regulirovaniya dizelnoy toplivnoy apparatury na dvigatele // Bashirov R.M., Safin F.R., Magafurov R.Zh., Yulberdin R.R., Tuktarov M.F., patent na izobretenie No. 2668589 ot 30.01.2018 g.

7. www.denso-am.eu. Denso. Electronical Technical Service Information.

8. Patent No. 5801308, G01F 3/24. Measuring apparatus for measuring an injected quantity of liquid. – Denso Corporation, Kariya, Japan. – Filed 04.09.1997. Pub. 1.09.1998.

References

1. Bashirov R.M. Avtotraktornye dvigateli: konstruktsiya, osnovy teorii i rascheta. – М.: Lan, 2017. – 335 s.



УДК 621.311.001.57

Г.В. Майстренко, А.Л. Куликов, Б.В. Папков, М.Д. Обалин
G.V. Maystrenko, A.L. Kulikov, B.V. Papkov, M.D. Obalin

СПОСОБЫ АДАПТАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА К ОТКЛОНЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

THE WAYS OF ADAPTATION OF EMERGENCY-STATE FAULT LOCATION OF POWER LINES BY ALGORITHMS TO DEVIATIONS OF VOLTAGE CHARACTERISTICS

Ключевые слова: адаптация, алгоритм, имитационное моделирование, качество электрической энергии, линия электропередачи, несимметрия напряжения, одиночное быстрое изменение напряжения, определение места повреждения, отклонение частоты, параметры аварийного режима.

Keywords: adaptation, algorithm, simulation modeling, voltage characteristics, power line, supply voltage unbalance, single rapid voltage change, fault location, power frequency deviation, emergency-state parameters.

Способы адаптации алгоритмов определения места повреждения (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП) по параметрам аварийного режима (ПАР) к отклонению показателей качества электрической энергии (ПКЭЭ) рассматриваются на примере междуфазных замыканий в сети с изолированной нейтралью. Решаются две основные задачи: получение распределения ошибок алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР вдоль длины ЛЭП при вариации отклонений ПКЭЭ и последующая разработка способов адаптации ОМП ЛЭП по ПАР к этим отклонениям. Объектом исследования является имитационная модель сети 110/35 кВ, созданная в библиотеке Simulink программного пакета Matlab. При адаптации применялись имитационное моделирование и цифровая обработка сигналов. Исследования показали, что наибольшее влияние на точность ОМП ЛЭП по ПАР оказывают отклонения частоты. При одиночном быстром изменении напряжения или несимметрии напряжения по обратной последовательности суммарная ошибка ОМП во всем диапазоне допустимых отклонений ПКЭЭ определяется в большей степени методической погрешностью исследуемого алгоритма. Предложенные методы адаптации позволяют значительно снизить влияние отклонений ПКЭЭ на точность ОМП ЛЭП по ПАР. Так, при учете особенностей и формировании зависимостей ошибки ОМП вдоль ЛЭП с помощью предложенных алгоритмов адаптации можно снизить ошибки с 10-15 до 0-0,3% от длины линии.

The ways of adaptation of emergency-state fault location of power lines algorithms to a deviation of voltage characteristics are considered by the example of phase-to-phase faults in the network with the isolated neutral. Two main problems are solved: receiving distribution of errors of emergency-state fault location of power lines algorithms along power line length under variation of deviations of voltage characteristics and development of ways of adaptation of emergency-state fault location of power lines algorithms to these deviations. The research target is the simulation model of network of 110/35 kV created in Simulink library of the Matlab software package. Simulation modeling and digital signal processing was applied at adaptation. The research showed that power frequency deviations had the greatest impact on emergency-state fault location of power lines algorithms accuracy. Under single rapid voltage change or supply voltage unbalance, the aggregate error of fault location in all range of tolerances of voltage characteristics is defined more by a methodical error of the studied algorithm. The proposed methods of adaptation allow reducing considerably the influence of deviations of voltage characteristics on emergency-state fault location of power lines algorithms accuracy. So, when accounting features and forming error distribution of emergency-state fault location of power lines algorithms along power line length by means of the proposed algorithms of adaptation, it is possible to decrease errors from 10-15% to 0-0.3% of line length.

Майстренко Георгий Владимирович, аспирант, каф. «Электрификация и автоматизация», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: yegor_maystrenko@ro.ru.

Куликов Александр Леонидович, д.т.н., проф. каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. E-mail: inventor61@mail.ru.

Папков Борис Васильевич, д.т.н., проф., каф. «Электрификация и автоматизация», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: boris.papkov@gmail.com.

Обалин Михаил Дмитриевич, к.т.н., н.с., каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»; Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. E-mail: obalin_misha@mail.ru.

Maystrenko Georgiy Vladimirovich, post-graduate student, Chair of Electrification and Automation, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics. E-mail: yegor_maystrenko@ro.ru.

Kulikov Aleksandr Leonidovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Power Engineering, Electricity Supply and Power Electronics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Ye. Alekseyev. E-mail: inventor61@mail.ru.

Papkov Boris Vasilyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Electrification and Automation, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economic. E-mail: boris.papkov@gmail.com.

Obalin Mikhail Dmitriyevich, Cand. Tech. Sci., Staff Scientist, Chair of Power Engineering, Electricity Supply and Power Electronics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Ye. Alekseyev. E-mail: obalin_misha@mail.ru.

Введение

Рост количества электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, значительный процент несимметричных нагрузок, работа понижающих трансформаторов в режимах недогрузки или перегрузки – все эти факторы способствуют отклонению показателей качества электрической энергии в нормальном режиме работы сельских электрических сетей (СЭС) [1]. Анализ текущего состояния СЭС демонстрирует

значительный износ большинства активов [2], что неизбежно приводит к повышению количества аварий. Поэтому в целях обеспечения приемлемого уровня надежности, сокращения времени восстановления электроснабжения потребителей, критично точное и оперативное определение места повреждения. Значительное распространение в устройствах ОМП отечественного производства получила группа методов ОМП линий электропередачи по параметрам аварийного режима [3].

Влияние изменений ПКЭЭ даже в пределах принятых допустимых диапазонов на точность ОМП ЛЭП по ПАР на текущий момент не до конца исследовано.

Поэтому оценка влияния допустимых отклонений ПКЭЭ на точность ОМП ЛЭП по ПАР и разработка способов адаптации для снижения этого влияния являются актуальными задачами.

Целью исследования является разработка способов адаптации ОМП ЛЭП по ПАР к отклонениям ПКЭЭ для повышения точности расчета расстояния до места повреждения.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих **задач**:

1) проведение имитационного моделирования и получение распределений ошибок алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР вдоль длины ЛЭП при отклонениях ПКЭЭ;

2) разработка и исследование способов адаптации алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР к отклонениям ПКЭЭ с учетом полученных распределений.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являлась имитационная модель электрической сети 110/35 кВ в библиотеке Simulink программного комплекса Matlab. С помощью метода имитационного моделирования были получены осциллограммы токов и напряжений при междуфазных повреждениях в различных точках ЛЭП 35 кВ и отклонениях ПКЭЭ в допустимом диапазоне. Путем цифровой обработки сигналов значения электрических величин из мгновенных переводились в комплексную форму (использовалось дискретное преобразование Фурье полного периода промышленной частоты в «скользящем окне»). С использованием комплексных значений токов и напряжений были получены зависимости ошибок алгоритмов ОМП по длине ЛЭП при вариации отклонений ПКЭЭ. На основе сформированных зависимостей были разработаны способы адаптации алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР к отклонениям ПКЭЭ.

Экспериментальная часть

Модель участка сети 110/35 кВ разработана в программном пакете Matlab с использованием блоков библиотеки Simulink. В таблице 1 представлены параметры моделируемого участка се-

ти. Параметры блоков Simulink подробно представлены в работе [4].

Отклонения ПКЭЭ имитировались с помощью параметров блока Three-Phase Programmable Voltage Source. Состав и связи имитационной модели характеризует рисунок 1.

В таблице 2 представлены исследуемые методы ОМП ЛЭП по ПАР.

Перевод значений электрических сигналов токов и напряжений из мгновенных в комплексные осуществлялся посредством дискретного преобразования Фурье полного периода в «скользящем окне» [5].

В работе [4] оценивалась степень влияния ПКЭЭ, характеризующих продолжительные изменения характеристик напряжения в соответствии с [6], на точность методов ОМП ЛЭП по ПАР. Причем, в таблице 3 приведены диапазоны и шаг отклонений ПКЭЭ, которые учитывались при имитационном моделировании.

Относительная погрешность ОМП ЛЭП по ПАР определяется выражением (4):

$$\varepsilon = \frac{X_e - X_f}{l_1} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где X_e – расстояние до повреждения соответствующего алгоритма ОМП;

X_f – реальное расстояние до повреждения;

l_1 – длина ЛЭП.

Имитационное моделирование позволяет получить базу данных распределений ошибок алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР вдоль длины ЛЭП при отклонениях ПКЭЭ, существующих в нормальном режиме. При известной величине отклонения ПКЭЭ можно реализовать способ адаптации алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР к отклонениям ПКЭЭ, аналогичный известным [10] и повышающий точность процедуры. Расстояние до повреждения предлагается определять по формуле (5):

$$X_f = X_e - \frac{\varepsilon_e \cdot l_1}{100}, \quad (5)$$

где X_f – расстояние до повреждения с учетом адаптации;

ε_e – ближайшее значение ошибки ОМП в базе, соответствующее обнаруженному отклонению ПКЭЭ и X_e .

Блок-схема предлагаемого алгоритма ОМП ЛЭП с учетом адаптации к изменениям ПКЭЭ представлена на рисунке 2.

Таблица 1

Блоки Simulink как элементы ЭЭС

Элемент ЭЭС	Параметры
Источник электроэнергии	110 кВ
Понижающий трансформатор 110/35 кВ	ТДН-40000/110
Линия электропередачи	Марка провода: АС-120/19; длина – 40 км
Повреждение	Междуфазные замыкания
Нагрузка	8+16j МВА

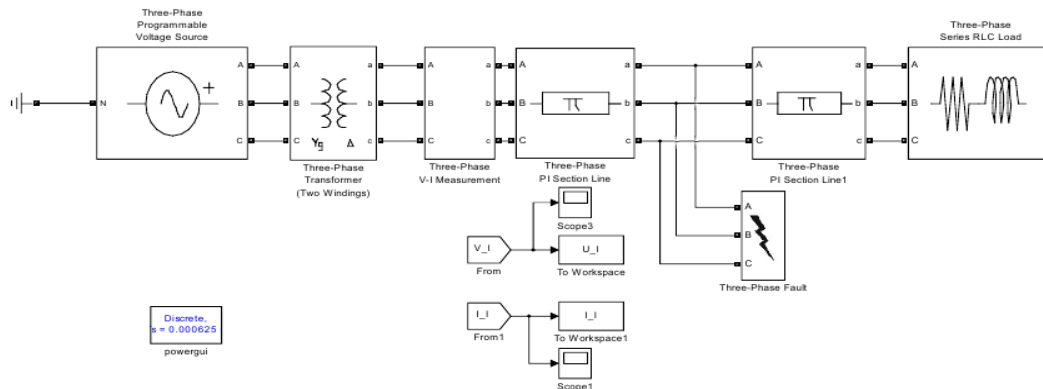


Рис. 1. Имитационная модель участка сети 110-35 кВ в Simulink

Таблица 2

Исследуемые методы ОМП ЛЭП по ПАР

№	Метод	Расчетные формулы
1	Takagi [7]	$x = \frac{\text{Im}(\dot{U}_r \cdot \Delta \hat{I}_r)}{\text{Im}(\dot{z}_{ul1} \cdot \dot{I}_r \cdot \Delta \hat{I}_r)} \quad (1)$
2	Ericsson [8]	$x = \frac{B_1 \cdot \sqrt{B_1^2 - 4 \cdot B_2 \cdot B_0}}{2 \cdot B_2};$ $B_1 = \text{Im}(\hat{k}_1 \cdot \hat{k}_3); B_2 = \text{Im}(\hat{k}_3); B_0 = \text{Im}(\hat{k}_2 \cdot \hat{k}_3); \hat{k}_1 = \frac{\dot{U}_r}{\dot{z}_{ul1} \cdot \dot{I}_r} + \frac{\dot{z}_{sr1}}{\dot{z}_{ul1}} + 1;$ $\hat{k}_2 = \frac{\dot{U}_r}{\dot{z}_{ul1} \cdot \dot{I}_r} \cdot \left(\frac{\dot{z}_{sr1}}{\dot{z}_{ul1}} + 1 \right); \hat{k}_3 = \frac{\Delta \hat{I}_r}{\dot{z}_{ul1} \cdot \dot{I}_r} \cdot \left(\frac{\dot{z}_{sr1} + \dot{z}_{ss1}}{\dot{z}_{ul1}} + 1 \right)$
3	Ankamma [9]	$x = \frac{\text{Im}(\dot{U}_r \cdot \Delta \hat{I}_b)}{\text{Im}(\dot{z}_{ul1} \cdot \dot{I}_r \cdot \Delta \hat{I}_b)} \quad (3)$

Примечание. \dot{U}_r – комплекс напряжения в точке замера; $\Delta \hat{I}_r$ – сопряженный комплекс аварийного тока в точке замера; \dot{z}_{ul1} – комплекс удельного сопротивления ЛЭП прямой последовательности; \dot{I}_r – комплекс расчетного тока в точке замера; \dot{z}_{sr1} – комплекс сопротивления прямой последовательности удаленной системы; \dot{z}_{ss1} – комплекс сопротивления прямой последовательности системы со стороны измерения; $\Delta \hat{I}_b = \hat{a}_{F1} \cdot \Delta \hat{I}_{rA1} + \hat{a}_{F2} \cdot \Delta \hat{I}_{rA2}$, где $\hat{a}_{F1}, \hat{a}_{F2}$ – весовые коэффициенты; \hat{I}_{rA1} – комплекс прямой последовательности аварийного тока фазы А в точке замера; \hat{I}_{rA2} – комплекс обратной последовательности послеаварийного тока фазы А в точке замера.

Таблица 3

Диапазоны и шаг отклонений ПКЭЭ при имитационном моделировании

№	ПКЭЭ	Диапазон	Шаг
1	Отклонение частоты Δf , Гц	± 5	1
2	Одиночное быстрое изменение напряжения δU , %	$\pm 6\%$	1
3	Несимметрия напряжения по обратной последовательности k_{2U} , %	0-4	1

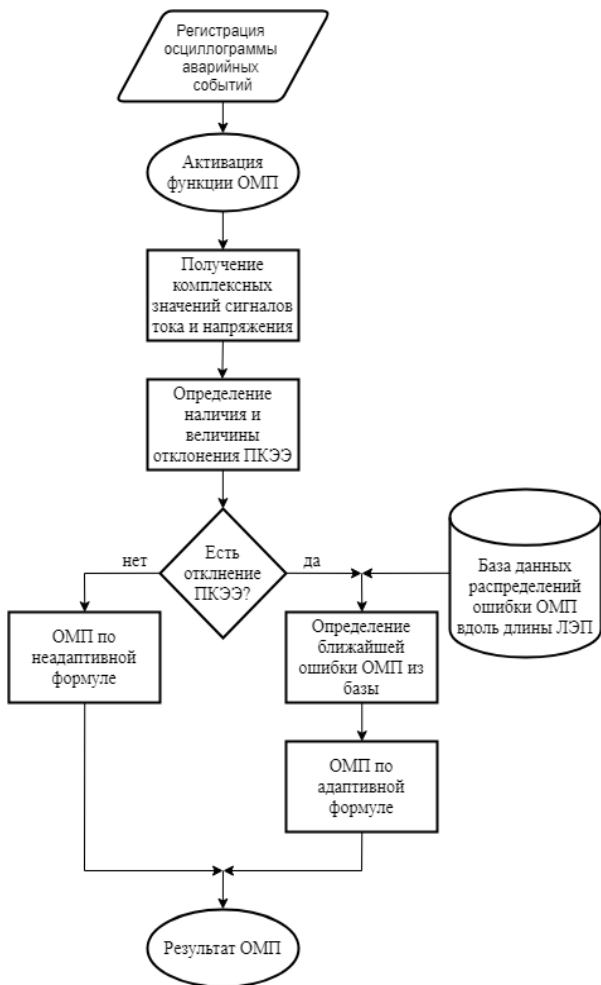


Рис. 2. Алгоритм адаптации ОМП к отклонениям ПКЭЭ

Результаты и их обсуждение

Зависимости ошибки ОМП вдоль ЛЭП на примере метода Takagi представлены на рисунке 3. Для других алгоритмов ОМП ЛЭП (табл. 1) зависимости имеют аналогичный вид.

Наибольшее влияние на точность ОМП ЛЭП по ПАР оказывает отклонение частоты. В зависимости от величины и знака отклонения ошибка ОМП изменяется в широком диапазоне (может быть как положительной, так и отрицательной) и находится в пределах $\pm 15\%$ от длины исследуемой линии.

В случае одиночного быстрого изменения напряжения или несимметрии напряжения по обратной последовательности суммарная ошибка ОМП во всем диапазоне допустимых отклонений ПКЭЭ определяется в большей степени методической погрешностью исследуемого алгоритма.

На рисунке 4 представлены погрешности алгоритмов ОМП ЛЭП по ПАР (табл. 1) при произвольном отклонении различных ПКЭЭ в допустимых пределах (табл. 3). ОМП реализовалось с учетом и без учета адаптации к изменению ПКЭЭ.

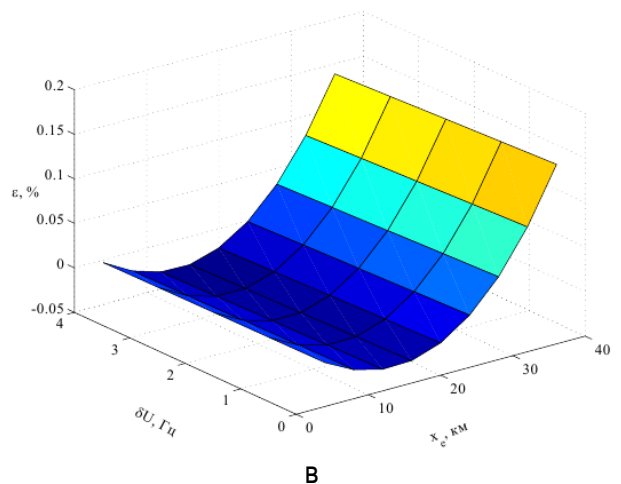
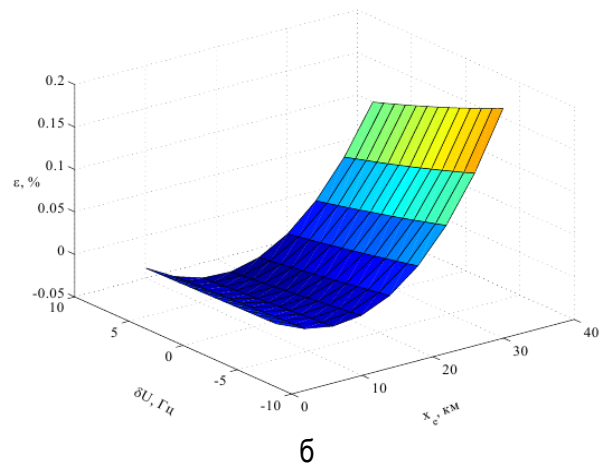
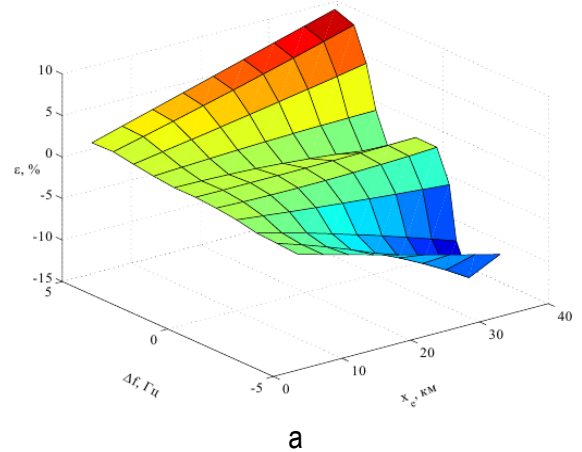


Рис. 3. Распределения ошибки метода Takagi при различных отклонениях ПКЭЭ: а – при отклонении частоты; б – при одиночном быстром изменении напряжения; в – при несимметрии напряжения по обратной последовательности

Очевидно, что предложенный адаптивный подход позволяет значительно снизить влияние на точность ОМП ЛЭП как сильно, так и слабо влияющих факторов. На его основе целесообразна разработка адаптивных способов ОМП ЛЭП при изменениях как отдельных, так и совокупности ПКЭЭ.

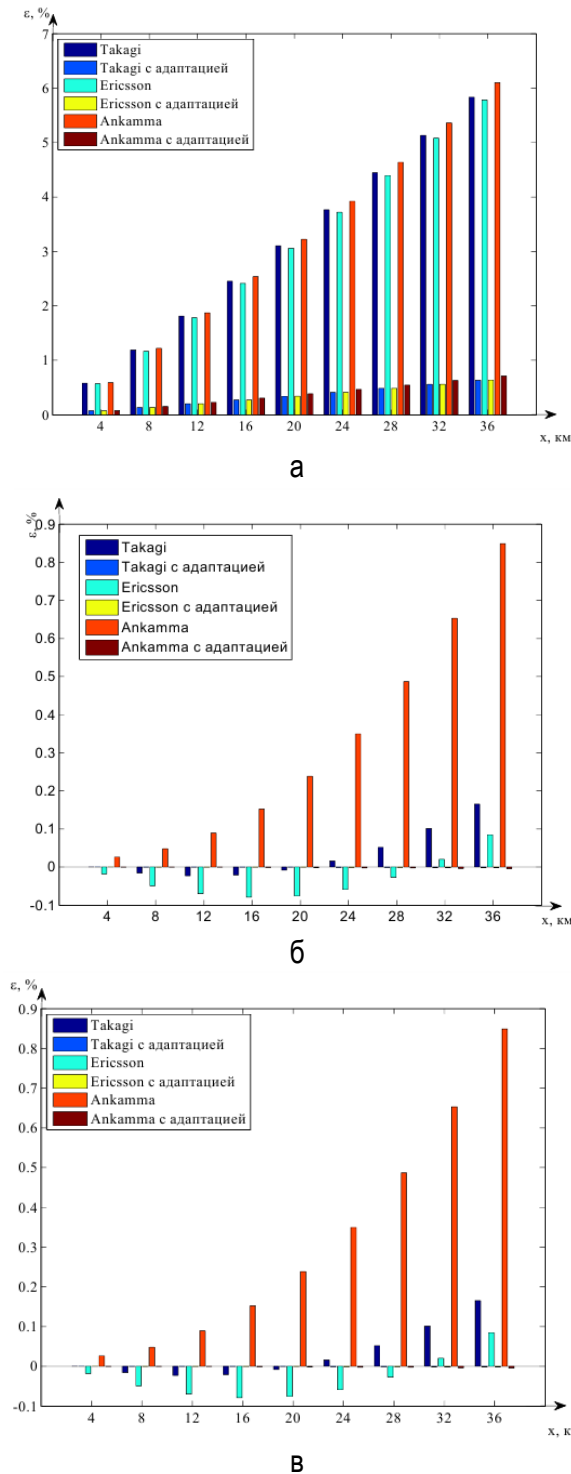


Рис. 4. Распределения ошибок методов ОМП ЛЭП по ПАР при отклонениях ПКЭЭ:
а – при отклонении частоты $\Delta f = 3,15$ Гц;
б – при одиночном быстром изменении напряжения $\delta U = -2,66\%$;
в – при несимметрии напряжения по обратной последовательности $k_{2U} = 3,26\%$

Анализ результатов имитационного моделирования (рис. 3, 4) показывает, что при учете особенностей каждого из ПКЭЭ, формировании зависимостей ошибки ОМП вдоль ЛЭП, а также реа-

лизации алгоритмов адаптации можно снизить ошибки с 10-15 до 0-0,3% от длины линии.

Выводы

1. Наибольшее влияние на точность ОМП ЛЭП по ПАР оказывает отклонение частоты. В зависимости от величины и знака отклонения ошибка ОМП сильно колеблется, может быть как положительной, так и отрицательной и находиться в пределах $\pm 15\%$ от длины исследуемой линии.

2. Предложен адаптивный подход, который позволяет значительно снизить влияние на точность ОМП ЛЭП по ПАР отклонений ПКЭЭ. На его основе целесообразна разработка адаптивных способов ОМП ЛЭП при изменениях как отдельных, так и совокупности ПКЭЭ.

3. Результаты имитационного моделирования показали, что введение адаптивных способов ОМП ЛЭП обеспечили снижение ошибки с 10-15 до 0-0,3% от длины линии.

Библиографический список

1. Боярская Н.П., Довгун В.П., Темербаев С.А., Шахматов С.Н. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 3. – С. 169-182.
2. Рощин О.А. Обзор систем электроснабжения сельских потребителей // Инновации в сельском хозяйстве. – 2012. – № 2. – С. 2-9.
3. Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи // Известия высших учебных заведений: электромеханика. – 2013. – № 5. – С. 57-62.
4. Куликов А.Л., Майстренко Г.В., Обалин М.Д., Папков Б.В. Устойчивость алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима к отклонениям качества электрической энергии // Вестник НГИЭУ. – 2019. – № 5. – С. 66-73.
5. Bhide S.R. Digital Power System Protection. Delhi. PHI Learning Private Limited, 2014. 273 p.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014 – 07 – 01. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2013. – 18 с.
7. Takagi T. et al. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and

current data. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* Vol. PAS-101: 2892-2898.

8. Eriksson L., Saha M.M., Rockefeller G.D. (1985). An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* Vol. PAS-104 (2): 423-436.

9. Ankamma Rao, J, Bizuayehu B. (2015). Accurate Fault Location Technique on Power Transmission Lines with use of Phasor Measurements. *International Journal of Engineering Research & Technology.* Vol. 4 (2): 492-495.

10. Куликов А.Л., Обалин М.Д. Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 35-39.

References

1. Boyarskaya N.P. Analiz kachestva elektroenergii v raspredelitelnykh setyakh APK / N.P. Boyarskaya, V.P. Dovgun, S.A. Temerbaev, S.N. Shakhmatov // *Vestnik KrasGAU.* – 2012. – No. 3. – S. 169-182.

2. Roshchin O.A. Obzor sistem elektrosnabzheniya selskikh potrebiteley // *Innovatsii v selskom khozyaystve.* – 2012. – No. 2. – S. 2-9.

3. Kulikov A.L. Analiz i povyshenie tochnosti pri opredelenii mesta povrezhdeniya liniy elektroperedachi / A.L. Kulikov, M.D. Obalin, P.A. Kolobanov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy: Elektromekhanika.* – 2013. – No. 5. – S. 57-62.

4. Kulikov A.L. Ustoychivost algoritmov opredeleniya mesta povrezhdeniya liniy elektroperedachi po parametram avariynogo rezhima k otkloneniyam kachestva elektricheskoy energii / A.L. Kulikov, G.V. Maystrenko, M.D. Obalin, B.V. Papkov // *Vestnik NGIEU.* – 2019. – No. 5. – S. 66-73.

5. Bhide S.R. *Digital Power System Protection.* Delhi. PHI Learning Private Limited, 2014. 273 p.

6. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. – Vved. 2014.07.01. – M.: FGUP «Standartinform», 2013. – 18 s.

7. Takagi T. et al. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* Vol. PAS-101: 2892-2898.

8. Eriksson L., Saha M.M., Rockefeller G.D. (1985). An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* Vol. PAS-104 (2): 423-436.

9. Ankamma Rao, J, Bizuayehu B. (2015). Accurate Fault Location Technique on Power Transmission Lines with use of Phasor Measurements. *International Journal of Engineering Research & Technology.* Vol. 4 (2): 492-495.

10. Kulikov A.L. Primenenie adaptivnykh protsedur v algoritmakh opredeleniya mesta povrezhdeniya LEP / A.L. Kulikov, M.D. Obalin // *Promyshlennaya energetika.* – 2013. – No. 12. – S. 35-39.

