

## **Адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП на основе имитационного моделирования**

**А.Л. КУЛИКОВ, М. Д. ОБАЛИН**  
**Нижегородский Государственный Технический**  
**Университет им. Р. Е. Алексеева**  
**Россия**  
**E-mail: kulikov@npmes.elektra.ru**

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Определение мест повреждения линий электропередачи (ОМП ЛЭП), имитационное моделирование, статистическая информация, повышение точности ОМП ЛЭП.

### **1 ВВЕДЕНИЕ**

Под адаптивной системой понимают - систему, автоматически изменяющую данные алгоритма функционирования и, иногда, свою структуру с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий. Под адаптивной системой релейной защиты понимают – защиту, которая реализует изменения в функциях защиты в соответствии с изменениями, происходящими в электроэнергетической системе [1,2,3].

Аналогично, под системой адаптивного определения места повреждения (ОМП) следует понимать - набор методов и средств оценки расстояния до места повреждения и зоны обхода, которые приспособляются к изменениям электроэнергетической системы и окружающей среды, с целью сохранения или достижения требуемого уровня точности вдоль всей линии электропередачи (ЛЭП).

Лишь некоторые существующие системы ОМП имеют в своем составе элементы адаптации. К их числу можно отнести изменение параметров (например, удельного сопротивления ЛЭП) при расчетах на различных участках линии [4] или компенсацию влияния переходного сопротивления в месте повреждения [5].

Следует отметить два важных обстоятельства. Во-первых, как отечественные, так и зарубежные программные и аппаратные средства ОМП используют единственный, индивидуализированный для каждого средства алгоритм расчета расстояния по всей длине ЛЭП. Очевидно, что использование группы алгоритмов, а тем более набор специальных групп для каждого из участков ЛЭП позволяет существенно повысить точность ОМП.

Во-вторых, для нужд предприятий электрических сетей, эксплуатирующих как магистральные, так и распределительные ЛЭП, важно точно определить не место повреждения, а требуемую зону обхода линии. Для принятия решения по ликвидации повреждения выбранную зону обхода необходимо сопоставить с информацией: об участках эксплуатационной принадлежности ЛЭП; ситуационном расположении линейных бригад; особенностями местности (лес, овраги, болота, жилые кварталы, места заезда линейных бригад на трассу ЛЭП; требуемыми временными параметрами по ликвидации повреждения и др.) При этом сокращение зоны обхода линии даже без повышения точности определения расстояния до повреждения можно связывать с повышением эффективности ОМП ЛЭП и также реализовать на основе адаптивных методов.

Информационной базой для адаптации алгоритмов определения мест повреждения могут стать имитационные модели, учитывающие специфику каждой конкретной ЛЭП и особенности режимов ее функционирования [6]. Именно с использованием адекватных имитационных моделей возможен сопоставительный анализ точности отдельных алгоритмов ОМП и обоснование преимуществ новых адаптивных методов.

## 2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В научно-технической литературе рассматриваются большое количество алгоритмов ОМП ЛЭП [4,5,7]. Методические ошибки алгоритмов имеют различную природу и могут отличаться не только по величине, но и знаку. Не редкими являются случаи, когда ошибка ОМП ЛЭП существенно превышает значения, декларированные паспортными данными соответствующего программного обеспечения или устройства, из-за наличия случайных факторов (сильный порывистый ветер, грозовые явления, гололед, переходное сопротивление, удельное сопротивление грунта и т.д.).

Наиболее распространенными и используемыми на предприятиях электрических сетей являются односторонние методы ОМП ЛЭП. Они проще в реализации, но обладают наибольшими ошибками. Поэтому построение адаптивных алгоритмов ОМП ЛЭП рассмотрим на примере односторонних методов.

При адаптации следует учитывать информацию, характеризующую неоднородность линии:

- различные типы опор, количество фаз на отдельных участках;
- марку провода, грозотроса;
- стрелы провеса, габариты, геометрию линии;
- тип грунта, удельное сопротивление земли;
- пересечения, сближения со смежными линиями;
- наличие нескольких источников, ответвлений и др.

Неоднородности приводят к ошибкам ОМП и требуют коррекции алгоритмов с учетом их специфического сочетания по трассе линии (рис. 1а).

Отдельные авторы [8,9] предлагают специальный выбор алгоритма ОМП с учетом особенностей конкретной ЛЭП. Выбор алгоритма целесообразно реализовать на основе имитационного моделирования. Однако применительно к выбранной ЛЭП алгоритмы ОМП остаются не адаптивными. В качестве одного из вариантов построения адаптивного алгоритма ОМП может стать комбинирование отдельных алгоритмов на соответствующих участках ЛЭП (рис. 1б).

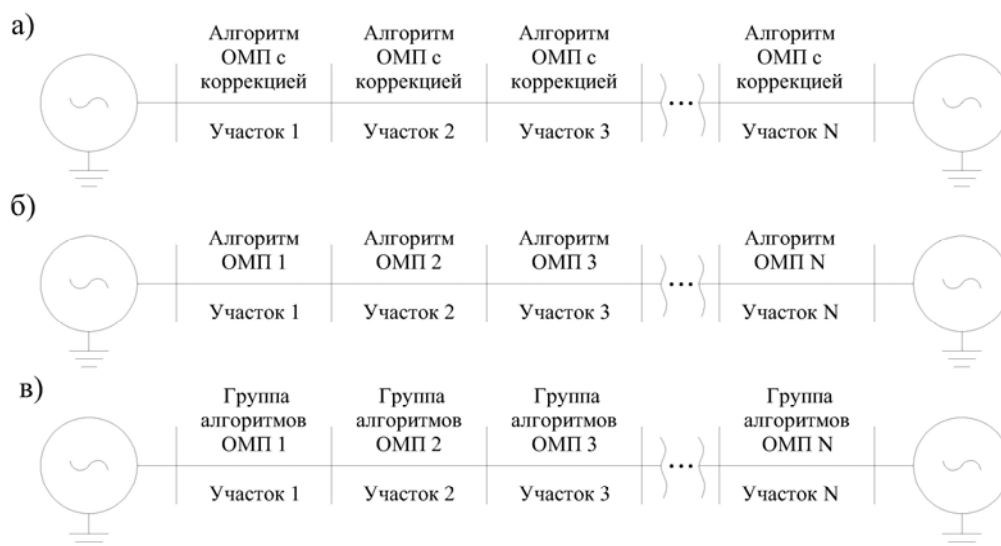


**Рис. 1:** Структурная схема работы алгоритма ОМП вдоль ЛЭП: а) обычный алгоритм; б) адаптивный алгоритм; в) групповой адаптивный алгоритмов.

Однако более целесообразно использование для адаптации групповых алгоритмов ОМП, сформированных с учетом взвешенного суммирования оценок расстояния до повреждения по каждому из входящих в группу [10] (рис. 1в). Усложненный адаптивный (групповой) алгоритм может основываться на опыте предыдущих имитационных экспериментов и аварийных

отключений ЛЭП. При этом обеспечивается компенсация систематических погрешностей частных и результирующего алгоритмов, а так же достигается высокая точность оценки расстояния до повреждения.

Основу адаптивной процедуры составляют уравнения упрощенной Калмановской фильтрации, принимающие для группового алгоритма следующее выражение:

$$\hat{x}_{(k+1)} = \hat{x}_k + (D_{(k+1)} / D_{y(k+1)}) \cdot (\hat{x}_{y(k+1)} - \hat{x}_k) \quad (1)$$

$$\frac{1}{D_{(k+1)}} = \frac{1}{D_k + D_{\mu k}} + \frac{1}{D_{y(k+1)}} \quad (2)$$

где  $\hat{x}_k$  - предыдущая оценка расстояния до места повреждения по адаптивному алгоритму;  $\hat{x}_{y_k}$  - оценка расстояния до места повреждения по одному из алгоритмов ( $y$ ) группы;  $D_k$  - дисперсия адаптивного алгоритма;  $D_{y_k}$  - дисперсия одного из алгоритмов группы;  $D_{\mu k}$  - коэффициент, который характеризует диапазон возможных изменений параметра оценки расстояния при обучении;

Логику функционирования адаптивного алгоритма иллюстрирует рис. 2а. Следует отметить, что для расчетов требуется предварительное имитационное моделирование, для получения весовых коэффициентов  $D_{(k+1)} / D_{y(k+1)}$ , с которыми происходит суммирование результатов реализации частных алгоритмов ОМП ЛЭП.

Важно, что для обеспечения требуемой точности ОМП на отдельном участке в состав группы может входить как один, так и достаточно большое количество частных алгоритмов ОМП. Выбор зависит от:

- Точности характеристик частных алгоритмов;
- Степени коррелированности ошибок оценки расстояния до повреждения между алгоритмами;
- Выбора последовательности алгоритмов в итерационной процедуре;
- От ряда других факторов.

Очевидно, чем более точный набор алгоритмов ОМП ЛЭП выбран в начале итерационной процедуры, тем быстрее будет получен требуемый результат.

Формирование зоны обхода также может быть реализовано по адаптивным процедурам (рис. 2б) и в соответствии с выражениями (1,2). При этом происходит замена переменных  $x$  на  $d$ , а алгоритм (рис. 2б) требует дополнительных имитационных экспериментов.

Для исследования предложенной методики привлекались средства имитационного моделирования электроэнергетических систем и объектов. В качестве объекта моделирования использовались линии 220-500 кВ Нижегородской энергосистемы.

Точность расчета расстояния напрямую зависит от параметров линии и электроэнергетической системы. Для формирования точностных характеристик ОМП необходимо обеспечить изменение этих параметров во всем возможном диапазоне принимаемых значений. Соответственно, в качестве варьируемых элементов имитационной модели использовались значения продольного и поперечного сопротивления П-образной схемы замещения ЛЭП для схем прямой и нулевой последовательности, данные удаленной системы и режима электропередачи. Диапазоны изменения варьируемых элементов представлены в табл. 1. Численные значения параметров (табл.1) выбраны в качестве иллюстрации методики построения комплексного алгоритма. Они должны уточняться для каждой анализируемой ЛЭП при сохранении общего подхода к построению алгоритма ОМП.

Результаты испытаний на имитационных моделях ЛЭП Нижегородской энергосистемы представлены на рис. 4. При расчетах для примера использовались: 1 метод – комплексный алгоритм на основе закона Ома [7, 11], 2 метод – метод на основе индикатора микропроцессорного фиксирующего (ИМФ-ЗР) [7], 3 метод – алгоритм на основе замера реактивной мощности [7].

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем**  
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.

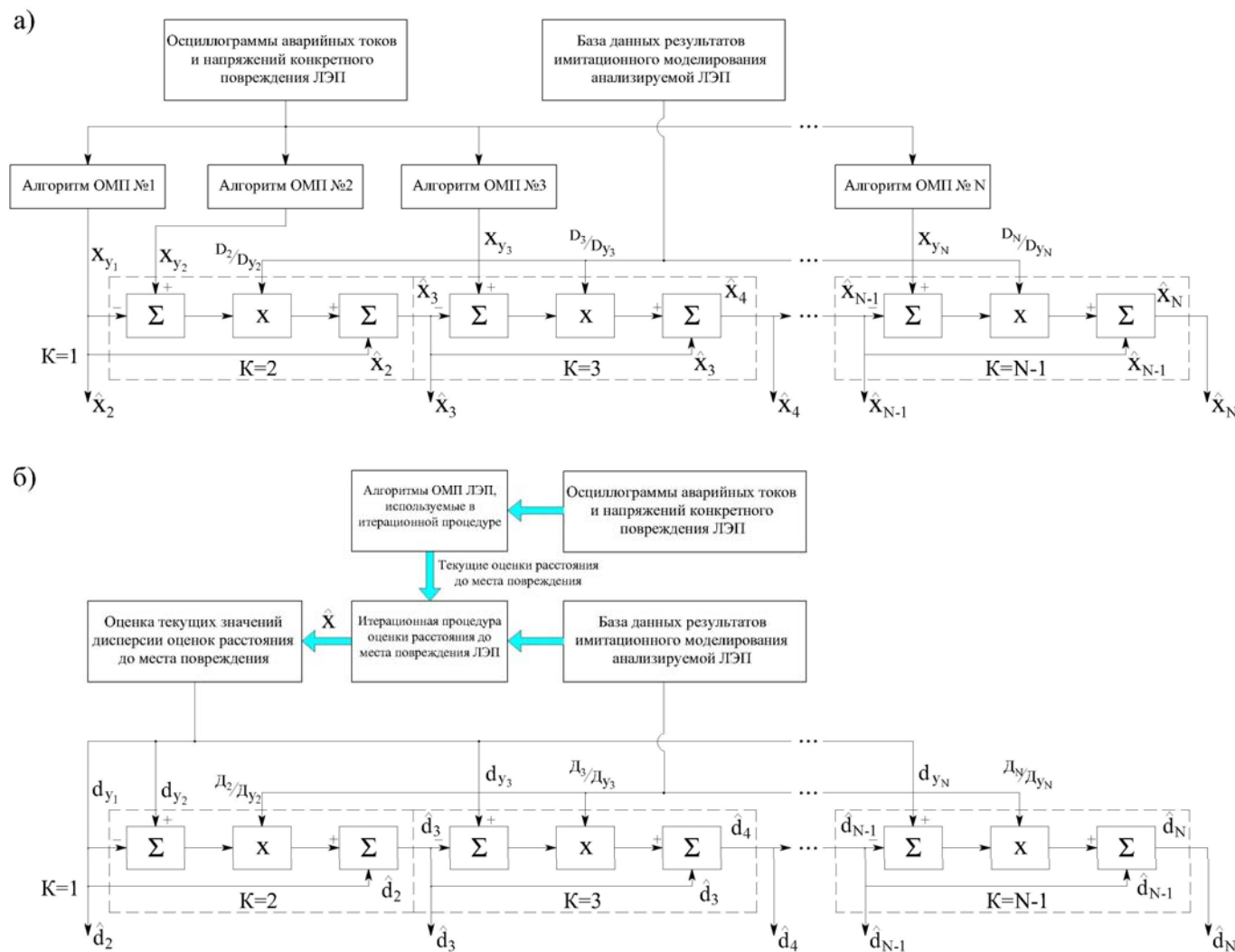


**Рис. 2:** Структурная схема: а) адаптивного группового алгоритма ОМП ЛЭП; б) адаптивного алгоритма формирования зоны обхода.

| Параметры имитационной модели                                                        | Закон распределения псевдослучайной величины             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Сопротивление прямой и нулевой последовательности на каждом участке ЛЭП ( $Z_{ли}$ ) | Нормальный закон со среднеквадратическим отклонением 10% |
| Сопротивление прямой и нулевой последовательности удаленной системы ( $Z_{с2}$ )     | Нормальный закон со среднеквадратическим отклонением 15% |
| Угол передачи ( $\delta$ )                                                           | Равномерный закон распределения $\delta = 0...60^\circ$  |

**Табл. 1:** Диапазон изменения параметров имитационной модели.

На рис. 3а приведено изменение среднеквадратической ошибки методов ОМП для ВЛ 500 кВ Луч-Нижегородская вдоль всей линии. Точность алгоритмов ОМП неоднородно изменяется вдоль линии, отдельные алгоритмы оказываются точнее на одних участках линии (метод 2 в начале ВЛ), другие на других участках линии (метод 3 в середине и конце ВЛ). При использовании заранее обученного и адаптированного алгоритма ОМП уровень среднеквадратической ошибки существенно снижается (рис. 3а).

К аналогичным результатам можно прийти при рассмотрении линии с транспозицией (рис. 3б, ВЛ 500 кВ Ульяновская – Южная). При работе группового адаптивного алгоритма первый и третий метод компенсируют ошибки второго (рис. 3б). Использование менее точного второго метода на данной линии обусловлено тем, что хотя метод и имеет наибольшую (среди используемых) среднеквадратическую ошибку на данной линии, он позволяет скомпенсировать завышенную оценку расстояния в середине линии и заниженную в конце ЛЭП. В следствии большой дисперсии его влияние на результирующую оценку расстояния невелико, но использование большего числа методов позволяет получать более устойчивую оценку.

Для ВЛ 220 кВ Луч – Нагорная (рис. 3в), связанной взаимной индукцией с соседней ЛЭП почти по всей длине, используемые методы при работе в групповом алгоритме компенсируют ошибки друг друга. Ни один из методов не дает приемлемого результата в целом для ЛЭП, только для отдельных ее участков. Групповая адаптивная оценка позволяет выбирать наиболее точные на данном участке методы и присваивать им наибольший вес в результирующей оценке расстояния. Тем самым повышая точность ОМП.

Важнейшими качествами адаптивного алгоритма ОМП является уменьшение дисперсии (степени разброса) групповой оценки расстояния (рис. 3) по сравнению с частными. Такое качество позволяет сократить зону обхода ЛЭП и в конечном итоге ускорить ликвидацию аварийной ситуации. Для односторонних алгоритмов ОМП ЛЭП характерно увеличение ошибки при повреждениях в конце линии (рис. 3). При этом именно групповой алгоритм обеспечивает требуемую для эксплуатации точность.

| Дата        | Наименование ВЛ                 | Длина ВЛ, км | Со стороны ПС | Микропроц. прибор ОМП, км | Расчетное место повреждения, км |                               |                  | Фактич. место повреждения, км |
|-------------|---------------------------------|--------------|---------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
|             |                                 |              |               |                           | ПК WinBres                      | Частные алгоритмы             | Групповая оценка |                               |
| 23.08. 2010 | ВЛ 500 кВ Луч – Нижегородская   | 46,51        | Луч           | 11.09                     | 10.919                          | 10.97<br>10.97<br>10.573      | 10.85            | 10.5                          |
| 08.03. 2011 | ВЛ 500 кВ Ульяновская – Южная   | 241,19       | Арзамас       | 27.1                      | 24.738                          | 26.67<br>26.67<br>26.332      | 26.557           | 25.77                         |
| 12.06. 2010 | ВЛ220 Семенов-Рыжково-Мантурово | 183,04       | Семенов с-кая | 93.8                      | 111.72                          | 106.816<br>106.414<br>103.262 | 105.48           | 107.25                        |

**Табл. 2:** Иллюстрация работы группового адаптивного алгоритма ОМП ЛЭП по осциллограммам реальных повреждений.

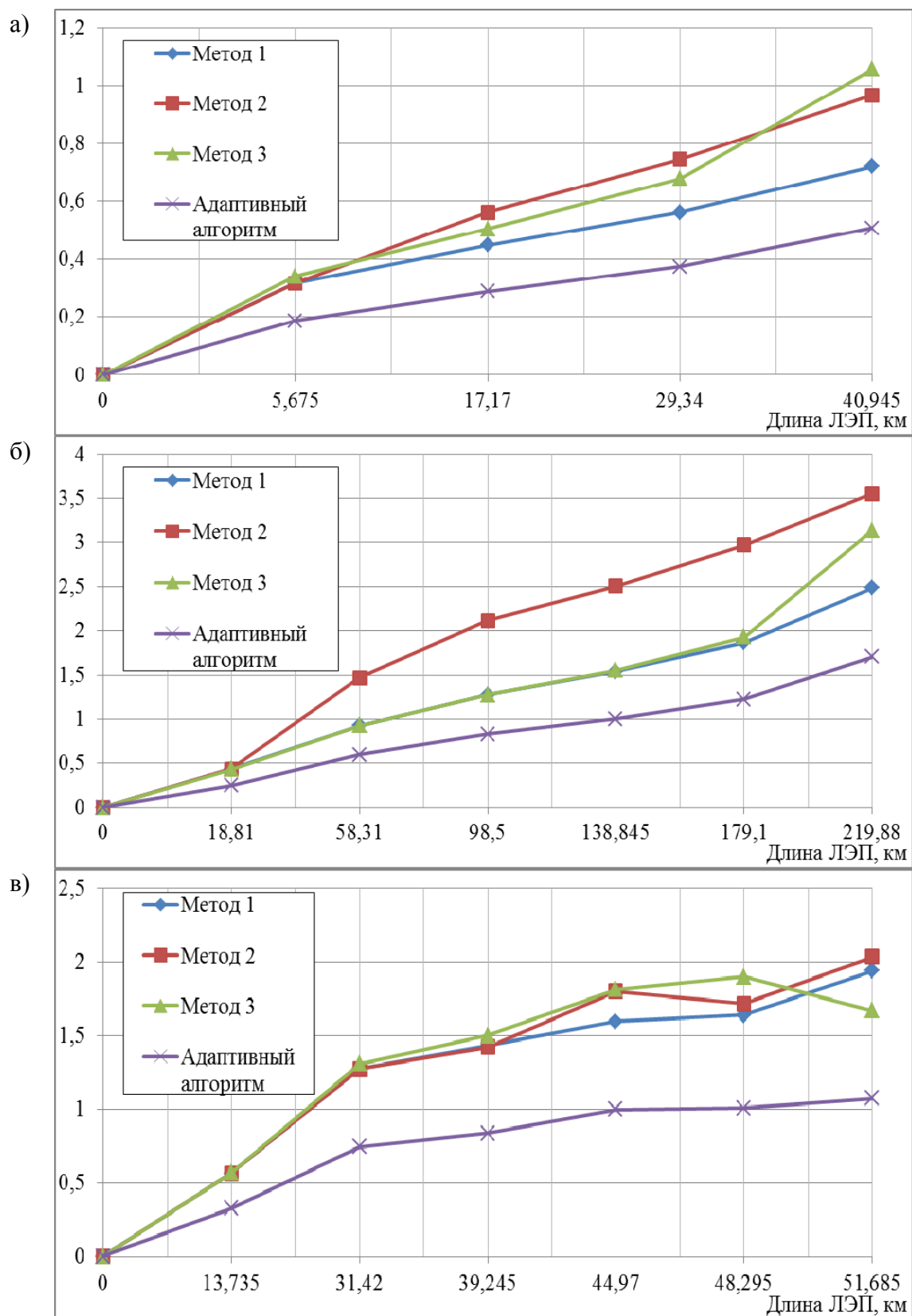


Рис. 3: Среднеквадратическая ошибка ОМП: а) ВЛ 500 кВ Луч-Нижегородская; б) ВЛ 500 кВ Арзамасская – Вешкайма; в) ВЛ 220 кВ Луч - Нагорная.

Преимущества адаптивных алгоритмов ОМП подтверждают результаты экспериментов с осциллограммами реальных повреждений ЛЭП. В табл. 2 приведены данные, характеризующие точность ОМП и полученные на основе аварийных отключений ЛЭП 500-200 кВ в 2010-2011 гг. в Нижегородской энергосистеме.

Таким образом, формирование обученного с использованием имитационного моделирования адаптивного алгоритма позволяет реализовать ОМП ЛЭП повышенной точности. Анализ ошибок одностороннего адаптивного алгоритма ОМП ЛЭП позволяет судить о приближении точности такого метода к двухстороннему ОМП

### 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Основу адаптации алгоритмов ОМП ЛЭП составляют статистические процедуры, основанные на результатах имитационного моделирования и данных реальных повреждений ЛЭП.

2) Использование адаптивных алгоритмов целесообразно для внедрения в существующие и разрабатываемые программно-аппаратные средства ОМП ЛЭП.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Phadke A. G., Horowitz S. H. Adaptive relaying// IEEE Computer Applications in Power Magazine. 1990. Vol. 3, № 3. P. 47-51.
- [2] Phadke A. G., Thorp J. S. Computer relaying for power systems. New York: Research studies press Limited, U.K. and John Wiley & Sons, 2009. – 326 p.
- [3] Лямец, Ю. Я. Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994 - 536 с.
- [4] Zimmerman K., Costello D., Impedance-Based Fault Location Experience, Journal of Reliable Power, July 2010, P. 15–29.
- [5] Saha M.M., Izykowski J., E. Rosolowski. Fault Location on Power Networks, 2009. – 432 p.
- [6] Куликов, А. Л. Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП/ А.Л. Куликов. Под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. Службы, 2006. – 315 с.
- [7] Аржаников Е. А., Лукоянов В. Ю., Мисриханов М. Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи/Под ред. В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [8] M. Kezunovic, M. Knezev, "Selection of Optimal Fault Location Algorithm," IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, July, 2008.
- [9] Kezunovic M., Luo S., Galijasevic Z., Ristanovic D., Accurate fault location in transmission networks using modeling, simulation and limited field recorded data: final project report/ Texas A&M University. 2002 – 50 p.
- [10] Куликов, А. Л. Комплексные алгоритмы определения мест повреждения линии электропередачи на базе статистических методов / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, П.А. Колобанов // Энергетик. – 2012г. - №1. – С. 7-10.
- [11] Takagi, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data / Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima // IEEE Trans. on Power App. & Sys., Aug 1982 - P. 2892-2898.