

## Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП

Обалин М. Д., аспирант, Куликов А. Л., доктор техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Приведены теоретические и практические результаты построения адаптивных алгоритмов определения места повреждения (ОМП) ЛЭП. Основу алгоритмов составляют статистические процедуры, основанные на результатах имитационного моделирования и данных реальных повреждений ЛЭП. На конкретных примерах ЛЭП Нижегородской энергосистемы анализируются преимущества разработанных адаптивных алгоритмов.

**Ключевые слова:** адаптация релейной защиты, определение мест повреждения линий электропередачи, имитационное моделирование, статистическая информация, повышение точности ОМП ЛЭП.

С развитием и интеллектуализацией электроэнергетических сетей все большее внимание уделяется адаптации и обучению систем релейной защиты и автоматики. Это актуально и при решении важной производственной задачи — поиска и устранения повреждений на линиях электропередачи (ЛЭП).

Под адаптивной системой понимают систему, автоматически изменяющую данные алгоритма функционирования, а иногда и 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 в соответствии с изменениями, происходящими в электроэнергетической системе [1–3]. Аналогично под системой адаптивного определения места повреждения 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 оценки вдоль всей линии электропередачи.

Практически все используемые в эксплуатации алгоритмы ОМП сами не изменяют логику расчета расстояния при изменении внешних условий (режима работы оборудования, состояния схемы сети, погодных и климатических условий), но могут иметь в своем составе элементы адаптации к изменению параметров (например, удельного сопротивления ЛЭП) при расчетах на различных участках линии [4] или компенсации влияния переходного сопротивления в месте повреждения [5].

При разработке современных систем ОМП следует учитывать три важных обстоятельства.

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

Во-вторых, для нужд предприятий электрических сетей, эксплуатирующих как магистральные, так и распределительные линии,

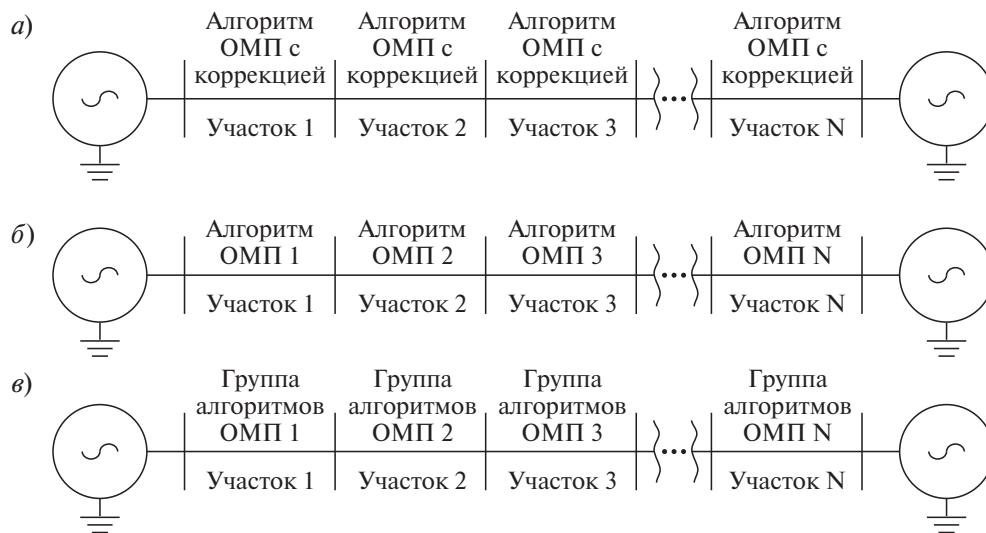


Рис. 1. Структурная схема работы алгоритма ОМП вдоль ЛЭП: обычный алгоритм (а); адаптивный алгоритм (б); групповой адаптивный алгоритм (в)

важно точно определить не место повреждения, а требуемую зону их обхода. Для принятия решения о ликвидации повреждения выбранную зону обхода необходимо сопоставить с информацией: об участках эксплуатационной принадлежности ЛЭП, о ситуационном расположении линейных бригад, особенностях местности (лес, овраги, болота, жилые кварталы, места заезда линейных бригад на трассу), о требуемых временных параметрах ликвидации повреждения и др. При этом сокращение зоны обхода линии обеспечивает повышение эффективности ОМП ЛЭП.

В-третьих, перспективно применение имитационных моделей линий электропередачи для определения возможной погрешности алгоритмов ОМП и их адаптации к конкретной ЛЭП, а также к режиму ее функционирования. Именно с использованием адекватных имитационных моделей возможны сопоставительный анализ точности отдельных алгоритмов ОМП и обоснование преимуществ новых адаптивных методов [6].

Методические ошибки алгоритмов имеют различную природу и могут отличаться не только по значению, но и по знаку. Нередки 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, изменение переходного сопротивления, удельного сопротивления грунта и т. д.). Применение имитационного моделирования позволяет спрогнозировать возможную ошибку

метода на определенном участке ЛЭП и при реальном ОМП скорректировать ее.

При создании адаптивных алгоритмов ОМП следует учитывать информацию, характеризующую неоднородность линии:

- разные 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. 1, а). Некоторые авторы [7, 8] предлагают специальный выбор алгоритма ОМП с учетом особенностей конкретной ЛЭП. Его целесообразно реализовать на основе имитационного моделирования. Но применительно к выбранной ЛЭП алгоритмы ОМП остаются неадаптивными. В качестве одного из вариантов построения адаптивного алгоритма ОМП может стать комбинирование отдельных алгоритмов на соответствующих участках ЛЭП (рис. 1, б). Однако более целесообразно использование для адаптации групповых алгоритмов ОМП, сформированных с учетом взвешенного суммирования оценок расстояния до повреждения по каждому из входящих в группу алгоритму [9] (рис. 1, в). Усложненный адаптивный (групповой) алгоритм может основываться на опыте предыдущих имитационных экспериментов и аварийных отключений ЛЭП. При этом

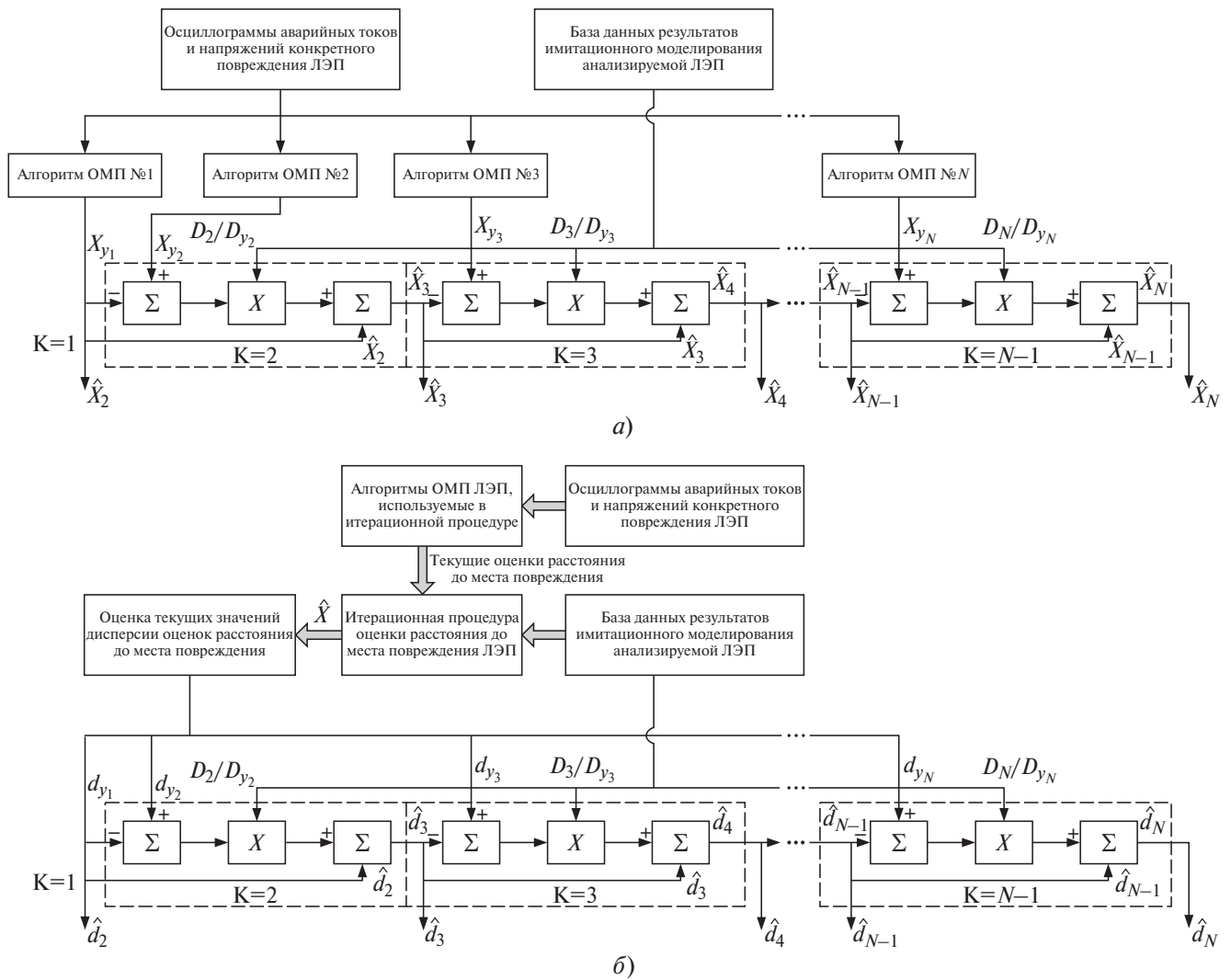


Рис. 2. Структурные схемы адаптивного группового алгоритма ОМП ЛЭП (а) и адаптивного алгоритма формирования зоны обхода (б)

обеспечивается компенсация систематических погрешностей частных и результирующего алгоритмов, а также достигается высокая точность оценки расстояния до повреждения.

Основу адаптивной процедуры составляют уравнения упрощенной Калмановской фильтрации. Для группового алгоритма они имеют следующий вид:

$$\hat{X}_{(k+1)} = \hat{X}_k + (D_{(k+1)} / D_{y_{(k+1)}}) (\hat{X}_{y_{(k+1)}} - \hat{X}_k); \quad (1)$$

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

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 группы у;  $D_k$  — дисперсия адаптивного алгоритма;

$D_{y_k}$  — дисперсия одного из алгоритмов группы;  $D_{\mu k}$  — коэффициент, характеризующий диапазон возможных изменений параметра оценки расстояния при обучении.

Логику функционирования адаптивного алгоритма иллюстрирует рис. 2, а. Следует отметить, что для расчетов требуется предварительное имитационное моделирование с целью 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 довольно большое количество частных алгоритмов. Выбор зависит от:

точностных характеристик частных алгоритмов;

степени коррелированности ошибок оценки расстояния до повреждения между алгоритмами;

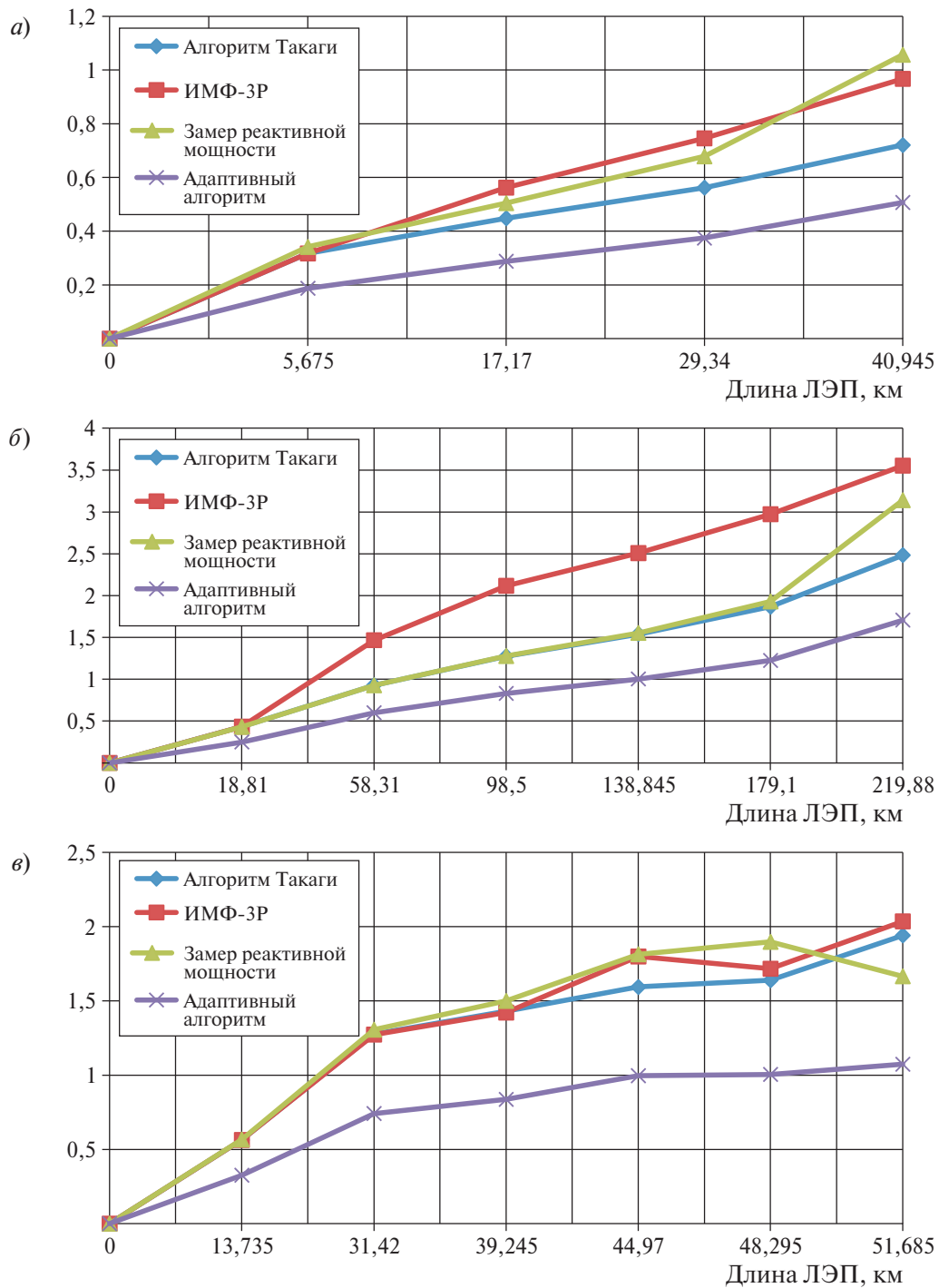


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка ОМП, км, для ВЛ 500 кВ Луч – Нижегородская (а), ВЛ 500 кВ Арзамасская – Вешкайма (б) и ВЛ 220 кВ Луч – Нагорная (в)

выбора последовательности алгоритмов в итерационной процедуре;  
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. 2, б) и в соответствии с уравнениями

(1) и (2). При этом происходит замена переменных  $X$  на  $d$ , а алгоритм (рис. 2, б) требует дополнительных имитационных экспериментов.

Для проверки предложенной методики были созданы имитационные модели линий 220 – 500 кВ Нижегородской энергосистемы. Расчет дистанции до места повреждения проводили по односторонним методам ОМП как наиболее востребованным на предприятиях

Дата	Наименование ВЛ	Длина ВЛ, км	Со стороны ПС	ИМФ-3Р, км	ПК WinBres, км	Адаптированный ИМФ-3Р, км	Адаптированный ПК WinBres, км	Фактическое место повреждения, км
21.10.2011	ВЛ 220 кВ Луч – Нагорная	53,6	Луч	41,1	44,58	43,4	46,43	47,42
23.08.2011	ВЛ 500 кВ Луч – Нижегородская	46,51	Луч	11,09	10,92	10,89	10,81	10,5
08.03.2011	ВЛ 500 кВ Ульяновская – Южная	241,19	Арзамас	27,1	24,74	26,5	25,56	25,77

электрических сетей. Использовали алгоритм Такаги [10], метод ИМФ-3Р и метод на основе замера реактивной мощности [11].

Имитационная модель обеспечивает опыты КЗ с определенным шагом вдоль всей длины ЛЭП. В результате получаем набор параметров (токов и напряжений) аварийного режима, по которым осуществляется расчет расстояния до места повреждения. Оценив систематическую погрешность алгоритма на выбранном участке линии (рис. 3), можно в последующем ее устранить. Например, для повреждения ВЛ 220 кВ Луч – Нагорная (21.10.2011) рассчитали расстояние до места повреждения по ИМФ-3Р (41,1 км) и ПК WinBres (44,587 км). Согласно результатам проверки работы алгоритмов ОМП по данным имитационного моделирования алгоритм ИМФ-3Р дает ошибку 2,3 км, а ПК WinBres – 1,85 км. Методы были скорректированы, и результаты расчета оказались ближе к фактическому месту повреждения (гирлянда изоляторов на опоре № 153 в 47,42 км от ПС Луч).

Аналогичные результаты получены и для других ВЛ.

Анализ таблицы свидетельствует, что предложенные адаптивные алгоритмы имеют выигрыш при оценке расстояния по сравнению с существующими алгоритмами на 3 – 5 %. Преимущества адаптивных алгоритмов ОМП подтверждаются результатами корректировки установленных на подстанциях терминалов ОМП. Применение обученного с использованием имитационного моделирования адаптивного алгоритма позволяет реализовать ОМП ЛЭП повышенной точности.

### Выводы

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.

### Список литературы

1. Phadke A. G., Horowitz S. H. Adaptive relaying. — IEEE Computer Applications in Power Magazine, 1990, vol. 3, № 3.
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.
3. Лямец Ю. Я. Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем: Автореф. дис. на соиск. учен. степени доктора техн. наук. М., 1994.
4. Zimmerman K., Costello D. Impedance-Based Fault Location Experience. — Journal of Reliable Power, July, 2010.
5. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks, 2009.
6. Куликов А. Л. Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / Под ред. М. Ш. Мисриханова. — Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006.
7. Kezunovic M., Knezev M. Selection of Optimal Fault Location Algorithm. — IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, July, 2008.
8. Accurate fault location in transmission networks using modeling, simulation and limited field recorded data: final project report / M. Kezunovic, S. Luo, Z. Galijasevic, D. Ristanovic. — TexasA&M University, 2002.
9. Куликов А. Л., Обалин М. Д., Колобанов П. А. Комплексные алгоритмы определения мест повреждения линии электропередачи на базе статистических методов. — Энергетик, 2012, № 1.
10. Takagi T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. — IEEE Trans. on Power App. & Sys., Aug. 1982.
11. 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.

inventor61@mail.ru