

УДК 621.311-52:681

И.П. ЗАБОЛОТНЫЙ (д-р техн. наук, проф.), **Д.А. МИШЛАКОВ****Государственное высшее учебное заведение****«Донецкий национальный технический университет»****ivp@elf.dgtu.donetsk.ua**

РАЗВИТИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье рассмотрены вопросы развития метода анализа аварийных ситуаций в электрических системах на основе измерений цифровых регистраторов. Уточнена информационная модель, описывающая потоки информации в ЛЭП, определяющие схемно-режимное состояние. Предложены методы адаптации модели электроэнергетического объекта под его текущее схемно-режимное состояние и технологическую задачу управления, уточнения математической составляющей модели на основе параметрической идентификации элементов системы по данным измерений предшествующего и аварийного режима регистраторами.

Анализ аварийных ситуаций, цифровые регистраторы, информационная модель, отыскание места повреждения, методы адаптации.

Введение. Анализ аварийной ситуации непосредственно после ее возникновения является необходимым условием эффективного управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) [1-2]. Существующие системы анализа аварийных ситуаций реализуют, в основном, информационную технологию, используя данные цифровых регистраторов и терминалов РЗА. В последние годы создаются интегрированные системы управления, в которых задача анализа аварийной ситуацией является одной из функций [3].

Для отыскания места повреждения на линиях электропередач используется модельная технология [4]. В математической модели фрагмента электрической системы с повреждением наращиваются информационная, топологическая (общее описание связей) и коммутационная (текущее состояние) составляющие, что приводит к созданию «жесткой», практически не адаптируемой модели.

Необходимость адаптации математической модели обусловлена тем, что параметры элементов ЭЭС, конфигурация ЭЭС, режимы работы отдельных объектов и в целом ЭЭС неизбежно меняются в процессе эксплуатации под влиянием различных факторов [5].

В условиях неполноты и неоднозначности данных об схемно-режимном состоянии ЭЭС создаваемые методы формирования данных, в основном, используют позадачный метод ведения информации, т.е. ориентированы на решение определенной технологической задачи управления, в лучшем варианте – нескольких и не всегда обеспечивают соответствие параметров модели состоянию объекта управления.

Применение цифровых регистраторов аварийных процессов в ЭЭС позволило создать архивы по переходным процессам при коротких замыканиях и других технологических нарушениях. Однако технология использования информации персоналом различных служб электроэнергетического объекта требует дальнейшего развития.

Внедрение системы мониторинга переходных процессов, обеспечивающее получение точных синхронизированных измерений векторов напряжений и токов, а также мгновенных значений параметров режима обеспечивает решение ряда задач управления ЭЭС на качественно новом уровне, в том числе задачи параметрической идентификации моделей элементов ЭЭС [6-11].

Цель работы. Развитие метода анализа аварийных ситуаций на основе создания адаптируемой модели электроэнергетического объекта, в которой при создании математической составляющей модели используются данные регистраторов, параметры магнитно связанных участков линий учитывают схемно-режимное текущее состояние линии (режим, направление тока, состояние троса, стрелу провеса). Работа направлена на развитие разработок, приведенных в [12-13].

Результаты исследований. На основании сформулированных требований к современным системам анализа аварийных ситуаций обоснован ряд исходных положений, которые необходимы для построения правильно сформулированных правил, составляющих основы технологии формирования модели «однородности» воздушной линии.

1. Информационными объектами линии являются участки и коридоры.

Участок линии отражает следующие особенности: марка провода и троса, расположение провода и тросов на опорах. Коридор линии отражает наличие иных линий по трассе при расстоянии между цепями до 500 м.

2. Модель имеет взаимосвязанное графическое и табличное представления. Существуют множество (коллекция) модификаций графических образов участков и коридоров. Графические образы участков соответствуют традиционным представлениям персонала о геометрической структуре расположения проводов и тросов на опоре. Графические образы коридоров отражают количество линий по трассе и направления токов в цепях.

© Заболотный И.П., Мишлаков Д.А., 2011

3. Совокупность графических образов информационных объектов представляет собой схему описания изображения линии и обеспечивает формирование фильтров обора информации для определения параметров схема замещения (математическая составляющая модели).

4. Этапы создания модели «однородности» линии:

- формирование участков при последовательном рассмотрении пролетов линии;
- формирование коридоров на основании имеющихся участков.

В процессе формирования модели происходит заполнение информационных составляющих графических образов представления схемы описания однородности и магнитных связей линии.

5. Свойства (параметры) сущностей инфологической составляющей модели должны быть распределены в виде множеств $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$, $\{x_{i+1}, \dots, x_j\}$ по взаимосвязанным таблицам.

6. Существуют:

- механизм отбора информации и связей, учитывающий особенности технологических задач служб подразделения предприятия;
- наборы адаптируемых шаблонов для отражения информации.

7. Наличие коллекций объектов позволяют формировать признаки для адаптации модели по таким факторам, как режимы линий в коридоре (цепь в работе, ремонт с заземлением цепи, направление передаваемой мощности в цепи, стрела провеса провода в пролете).

8. Технология создания схемы описания линии реализуется на основе интерактивного диалога пользователя, реализуемого с помощью запросов и ответов. Для автоматизации диалога используются позиции ниспадающие меню, библиотеки графических образов, информация из баз данных.

9. Разработка метода создания инфологической составляющей модели линии на основе типа линии, наличия участков с разными проводами, расположения проводов и тросов на опорах, прохождения иных линий по трассе при расстоянии между цепями до 500 м является основой для создания адаптируемой математической составляющей модели линии.

Предложен метод, обеспечивающий адаптацию модели ЛЭП под ее текущее схемно-режимное состояние. Метод базируется на инфологической модели, учитывающие наличие однородных и магнитно связанных участков линий, и методике построения модели магнитно связанных линий (расстояние между осями линий не более 500 м). Инфологическая модель реализована в базе данных, а методики в графическом интерфейсе пользователя.

Инфологическая модель является частью информационной модели электроэнергетического объекта. На рис. 1 представлен фрагмент модели без отражения графической части. Существующие информационные модели, описывающие потоки информации и связи в ЭЭС, устройствах РЗА (источники команд, условия срабатывания и пуска, объекты воздействия, реакции), цифровых регистраторах (место установки канала, списание связей с элементами и устройствами наблюдения и др.) приведены в [8-9].

Информационная модель представляет три взаимосвязанных разветвляющихся информационных потока: общие сведения о ЛЭП, пролеты и опоры. Далее под коридором понимается участок линии, имеющий магнитные связи с участками других линий.

Методика построения модели коридоров совокупности линий включает следующие этапы:

- формирование схемы однородных участков (без учета магнитных связей) по критериям (тип провода на опоре, тип троса, тип опоры и геометрическое расположение проводов на опоре, количество цепей на опоре) и сохранение в БД;
- формирование схемы участков с магнитными связями между линиями и сохранение в БД;
- формирование схемы обобщенных участков на основе выбора участка из схемы однородных, отнесения участка к коридору. При этом используются списки коридоров из БД, отфильтрованные по ключу линии, участок которой выбран.

На этапе формирования участков используется набор графических шаблонов, отображающих схематичное расположение проводов и тросов на опорах и число цепей. В процессе интерактивного диалога формируется схема однородных участков с занесением на шаблоны в специальные окна информации о типе провода и троса и длине участка. Каждый этап содержит опции «создания», «коррекции», «добавления» и «удаления». На этапе расчета удельных параметров обобщенных участков линии электропередачи стрела провеса провода в пролете учитывалась по методике, приведенной в [14].

На рис. 2 показана информация в виде отдельных фрагментов по графическим шаблонам, меню пользователя, выводимых в процессе диалога на экран дисплея.

Шаблон предусматривает использование полей для задаваемой пользователем конфигурации расположения проводов с сохранением информации в БД, что позволяет проводить исследования по влиянию конфигурации линии на параметры ее режима.

Синхронизированная регистрация векторов напряжений и токов с помощью СМНР используется для исследования и управления переходными режимами ЭЭС. В [15] показано, что двухмерная форма представления векторов токов и напряжений является неэффективной для адекватного представления электрических величин для реализации этапа использования синхронизированных векторных измерений в условиях электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся возникновением нескольких

свободных составляющих в измеряемых токах и напряжениях. Двухмерная форма представления векторов не позволяет правильно учитывать свободные составляющие.

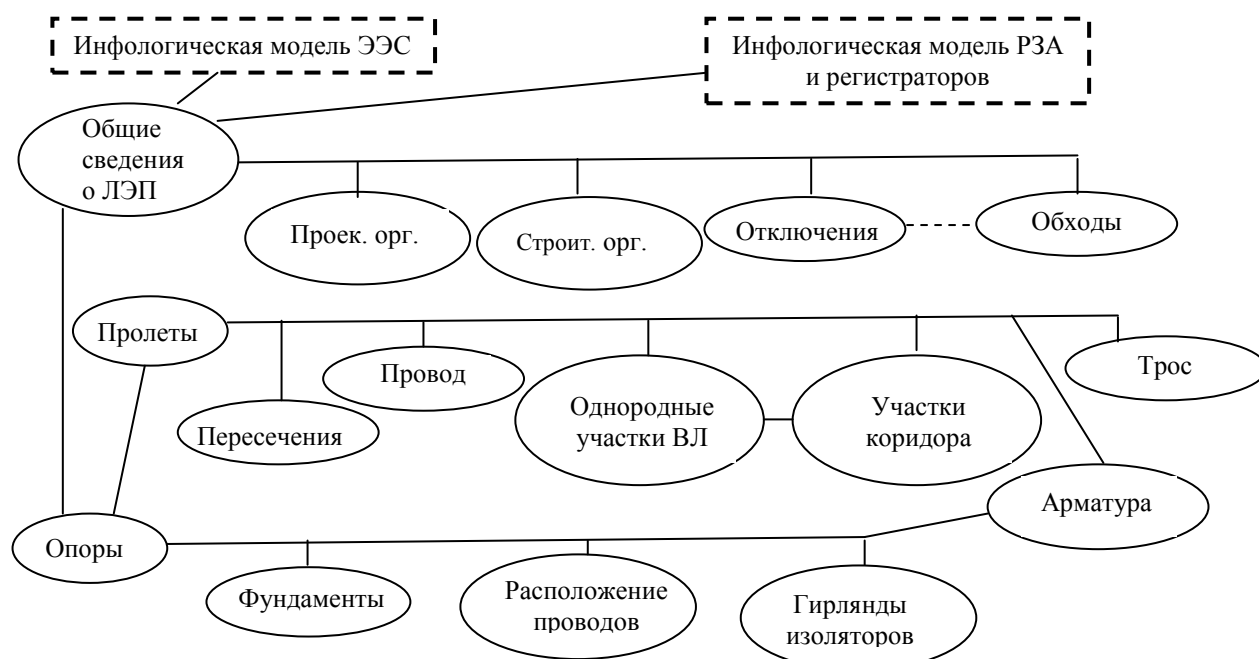


Рисунок 1 – Инфологическая модель в виде диаграммы Бахмана

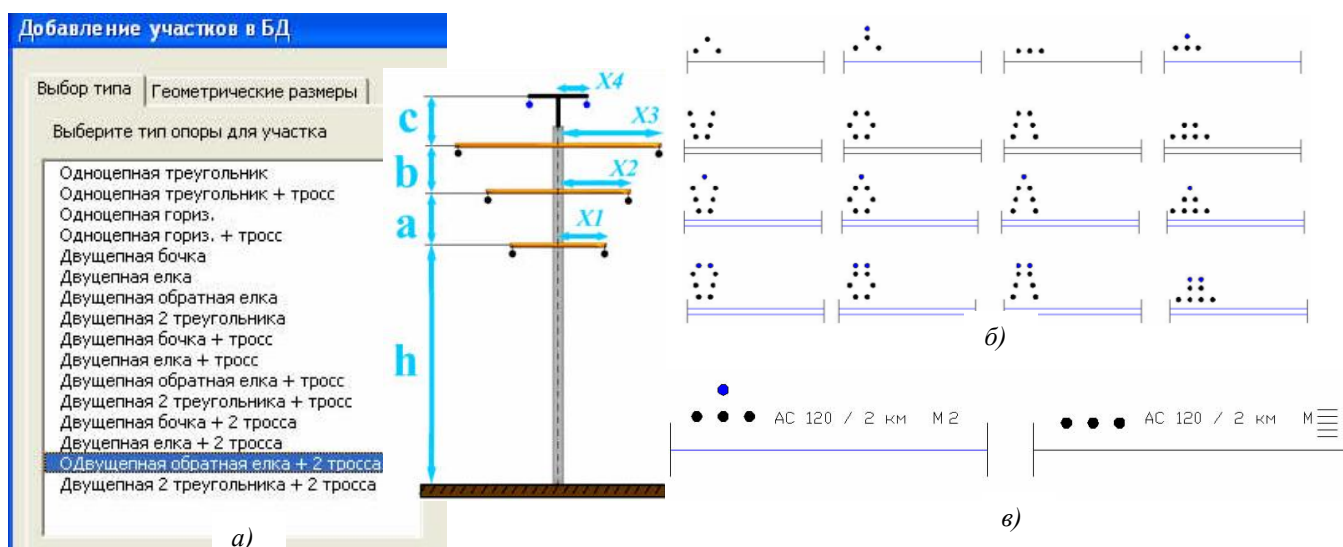


Рисунок 2 – Элементы, отражающие процесс использования графического интерфейса пользователя (а – меню расположения проводов и изображений опор; б – графические шаблоны; в – графическая модель коридора)

Обобщенное описание векторов может быть представлено в виде сумм комплексных амплитуд с комплексной частотой:

$$i(t) = \text{Im} \sum_{k=1}^n \dot{I}_{mk} e^{t(-1/T_k + j\omega_k)}, \quad (1)$$

где $\dot{I}_{mk} = I_{mk} e^{j\alpha_k}$ – комплексная амплитуда k-ого слагаемого; $-\frac{1}{T_k} + j\omega_k$ – комплексная частота k-ого слагаемого.

Для построения моделей элементов электрических систем (генераторы, эквивалентные системы, линий электропередач, трансформаторы, реакторы и др.) предлагается формировать задачу как оптимизационную и использовать для выполнения параметрического синтеза метод наименьших квадратов.

Определение параметров модели по данным переходных процессов выполняется согласно (1) с учетом всех составляющих. Коэффициенты затухания экспоненциальных функций являются последовательными величинами по значению, что позволяет снизить размерность вектора искомых параметров, установив для них зоны по чувствительности (интервалы времени, в которых наибольшее влияние на расчетное изменение сигнала оказывают параметры одной из составляющих). Процесс поиска параметров начинается с последнего подинтервала с момента наступления установившегося значения сигнала. При этом параметры их составляющих относятся к группе постоянных. По мере рассмотрения других зон временного диапазона состав варьируемых и временно постоянных меняется.

При определении параметров модели по векторам напряжения и тока установившегося режима из (1) исключаются соответствующие составляющие.

В этом случае текущие значения тока или напряжения могут быть рассчитаны по выражению:

$$y(t) = Y_s \cdot \sin(x + \varphi) + A_0, \quad (2)$$

где Y_s – действующее (амплитудное) значение сигнала; φ – угол сдвига; $x = \omega t$ – текущее значение угла; A_0 – смещение, которое определяется схемой измерения. Возможно аппаратное решение устройства регистрации, когда смещение равно нулю, что соответствует зависимостям для мгновенных изменений токов и напряжений.

При использовании метода наименьших квадратов функция качества для задачи определения параметров Y_s, φ , имеет вид:

$$F(Y_s, \varphi, A_0) = \sum_{k=1}^N (Y_s \sin(x_k + \varphi) + A_0 - y_k)^2, \quad (3)$$

где N – число измерений, y_k – текущее (дискретное) значение сигнала в момент времени t_k .

Идентификация модели заключается в определении значений параметров Y_s, φ, A_0 , при которых функция качества (3) достигает минимального значения. Система уравнений для поиска неизвестных значений аргументов представлена ниже:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial Y_s} F(Y_s, \varphi, A_0) &= \sum_{k=1}^N 2(Y_s \sin(x_k + \varphi) + A_0 - y_k) \cdot \sin(x_k + \varphi) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} F(Y_s, \varphi, A_0) &= \sum_{k=1}^N 2(Y_s \sin(x_k + \varphi) + A_0 - y_k) \cdot Y_s \cdot \cos(x_k + \varphi) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial A_0} F(Y_s, \varphi, A_0) &= \sum_{k=1}^N 2(Y_s \sin(x_k + \varphi) + A_0 - y_k) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для решения оптимизационной задачи был выбран метод Давидона-Флетчера-Пауэлла, который относится к методам с переменной метрикой и сочетает положительные стороны методов минимизации первого и второго порядков. На основании известных зависимостей токов и напряжений при использовании традиционных схем замещения, например, Г-образных для трансформаторов, П-образных для линий электропередач, определяются их параметры.

Оценка эффективности определения параметров схем замещения элементов ЭЭС выполнялась путем математического моделирования результатов измерений. Псевдоэкспериментальные зависимости тока и напряжения были получены путем наложения шума на результаты вычислений по выражению (2) при заданных параметрах (опорные значения) (рис. 3).

На основе обработки псевдоэкспериментальных зависимостей были изучены требования к регистраторам по дискретности опроса, точности измерения.

Шум создавался с помощью линейной зависимости с нормально распределенной ошибкой. Амплитуда ошибки изменялась от 0,2 до 15%. Результаты анализа показали, что при дискретности опроса, обеспечивающем измерения в десяти точках на период промышленной частоты, погрешности определения параметров сигналов и значений активной и реактивной мощностей не превышали 0,5% от опорных значений.

В статье также рассмотрена обработка сигналов при высоком уровне шумов с помощью вейвлет функций. Как известно, основой этих функций являются дискретные волновые преобразования. Достоинством дискретных волновых преобразований является то, что они ограничены в некоторой узкой области интервала, вне которого бесконечно приближаются к нулю. Синусоиды же, используемые в преобразовании Фурье, осциллируют на всем промежутке, что ухудшает качество обработки сигнала.

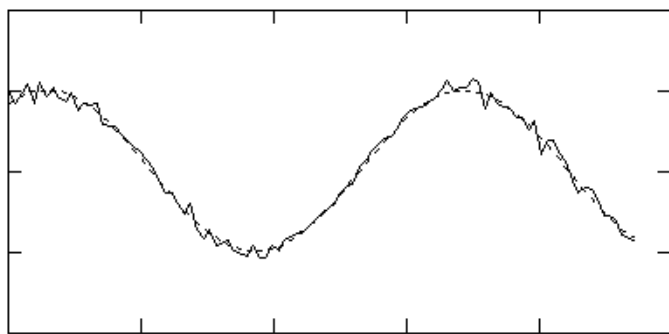


Рисунок 3 – Псевдоэкспериментальная зависимость (штриховая линия – опорный сигнал; сплошная – после наложения шума, 15%)

Выводы. Разработана инфологическая составляющая модели ЛЭП, описывающая потоки информации и позволяющая учитывать текущее состояние объекта.

Предложены методы адаптации модели электроэнергетического объекта под его текущее схемно-режимное состояние и технологическую задачу управления.

Предложена методика уточнения математической составляющей модели электроэнергетического объекта для задачи анализа аварийных ситуаций за счет использования параметрической идентификации элементов системы по данным измерений предшествующего и аварийного режима регистраторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заболотный И.П. Автоматизация анализа аварийных ситуаций в электрических системах / И.П. Заболотный // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". – Випуск 67. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – С. 26-30.
2. Автоматизированная система комплексного контроля (АСКК) на объектах энергетики ООО «ЭнергоКомГруп» – М.: 2010.
3. Яндульский А.С. Система контроля и управления электрической подстанцией MES-SEPM / А. С. Яндульский, О.И. Курсон, И.Н. Блощаневич, А. В. Гинайло, М. В. Мартынюк, П. С. Лукьянчук // Электрические сети и системы. – 2005. – №4-5.
4. Аржанников Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.; Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
5. Алюнов А.Н. Идентификация параметров схем замещения Электрических систем по данным регистраторов аварийных процессов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / А.Н. Алюнов. – СПб, 2004. – 16 с.
6. Куликов А.Л. Экспериментальный комплекс по определению мест повреждений магистральных линий электропередачи / А.Л. Куликов, М.Ш. Мисриханов, Д.М. Кудрявцев // CIGRE. – Чебоксары: 2007. – S6-2 – С. 9-13.
7. Куликов Ю.А. Перспективы применения векторной регистрации параметров в управлении режимами ЕЭС России / Ю.А.Куликов, А.В.Жуков, И.Е. Мацкевич // Релейная защита и автоматика энергосистем. – М.: 2010.
8. Аюев Б.И. Перспективные направления использования системы мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС / Б.И. Аюев, Ю.А. Куликов // Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems. CIGRE. – Cheboksary: 2007.
9. Герасимов А. С. Опыт верификации динамической модели ЕЭС/ОЭС по данным системы мониторинга переходных режимов / А.С. Герасимов, А. Х. Есипович, А.Н. Смирнов, Ю.А. Куликов Ю. А. // Известия НИИ постоянного тока. – 2008. – № 63. – С. 20–30.
10. Kezunovic M. Automated Transmission Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling at Two Ends / M. Kezunovic, B. Perunicic // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – Vol. 11. – No. 1.
11. Kezunovic M. Improved Transmission Line Protection During Cascading Events / M. Kezunovic, C. Pang // CIGRE. Madrid. – 2007. - B5 Colloquium.
12. Заболотный И.П. Автоматизированный анализ аварийных ситуаций в электрических системах / И.П. Заболотный, Д.А. Мишлаков // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, КДПУ. - 2007(44). – №3. – С. 91-94
13. Заболотний І.П. Аналіз аварійних ситуацій в електричних системах на основі web- технології / І.П. Заболотний, Д.О. Мішлаков, Л.М. Шаповалов // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – №637. – С. 31-34.
14. Гринь А.И. Методика расчета индуктивного сопротивления линии с учетом провисания проводов / А. И. Гринь, Ю.Г. Кононов, А.Ю. Кононов, А.А. Шкиря, В.М. Пейзель, А.С. Степанов // Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная». – 2010. – № 6.
15. Максимов Б.К. Методика измерений электрических величин в гипервекторной форме/ Б.К. Максимов, Я.Л. Арцишевский, Т.Г. Климова, Д.М. Журавлев и др. // Известия вузов. Электромеханика. Электрообеспечение. Спецвыпуск. – 2009. – С. 38-40.

Надійшла до редколегії 13.04.2011

Рецензент: С.Ф.Жуков

І.П. ЗАБОЛОТНИЙ, Д.О. МІШЛАКОВ
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

Розвиток методу аналізу аварійних ситуацій в електроенергетичних системах. У статті розглянуті питання розвитку методу аналізу аварійних ситуацій в електричних системах на основі вимірів цифрових реєстраторів. Уточнено інформаційну модель, яка описує потоки інформації в ЛЕП, що визначають схемно-режимний стан. Запропоновано методи адаптації моделі електроенергетичного об'єкта під його поточний схемно-режимний стан і технологічну задачу керування, уточнення математичної складової моделі на основі параметричної ідентифікації елементів системи за даними вимірів попереднього й аварійного режиму реєстраторами.

Аналіз аварійних ситуацій, цифрові реєстратори, інформаційна модель, відшукування місця ушкодження, методи адаптації.

I. ZABOLOTNIY, D. MISHLAKOV
State Institution of Higher Education
«Donetsk National Technical University»

Development of the Fault Analysis Method in Electric Power Networks. The questions of development of the fault analysis method in electric power networks on the basis of digital recorders measurements are considered in this article. It was refined information model that describes the information flows in transmission lines that define the scheme-modal state. There are proposed methods of adapting the model of the electroenergy object under its current scheme-modal state and technological problem management, clarifying the mathematical component of the model-based parametric identification of system elements on measurement data of the previous regime and emergency registrars.

Analysis of emergency situations, digital recorders, the information model, finding fault, methods of adaptation